



M 2015

DESENVOLVIMENTO E PROGRAMAÇÃO DE AUTOMATISMOS AUXILIARES AO CAM

ESTÁGIO REALIZADO NO CEIIA

JOANA INÊS BERNARDO GARCIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

PROFESSOR VITOR MARTINS AUGUSTO

<i>CANDIDATO</i>	Joana Inês Bernardo Garcia	<i>Código</i>	201001925
<i>TÍTULO</i>	Desenvolvimento e programação de automatismos auxiliares ao CAM		
<i>DATA</i>	20 de Julho de 2015		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 10:00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Laura Ribeiro	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Carlos Relvas	DEM/UA
	<i>Orientador</i>	Vitor Martins Augusto	DEMM/FEUP

RESUMO

No seguimento de uma abordagem às tecnologias de maquinagem assistida por computador (no âmbito da unidade curricular “Seminário” do MIEMM), foi frequentado um estágio numa empresa com recursos disponíveis nesse sentido, tendo surgido a oportunidade de acompanhar a equipa responsável pela programação e manipulação dos equipamentos de maquinagem que recorrem a controlo numérico. Nesse contexto, foi possível entrar em contacto com diferentes processos de maquinagem, sendo programadas peças com a utilização de 2 eixos até 5 eixos contínuos.

Dada a familiarização com a aplicação CAM utilizada na programação da maquinagem, houve ainda um enfoque no melhoramento e simplificação da utilização da mesma, através de automatismos, sob a forma de macros.

Neste documento são descritos projetos que promoveram um crescente conhecimento da aplicação em questão, aplicada especificamente aos processos utilizados no CEIIA, e projetos que envolveram o desenvolvimento de automatismos no sentido de melhorar a interação com a aplicação.

Palavras-chave: CAM, CNC, centro de maquinagem, célula robótica, PowerMILL, macros, pós-processamento

ABSTRACT

Following an approach to computer-aided manufacturing technologies, as part of a subject of the Master in Metallurgical and Materials Engineering, emerged the interest in an internship in a company that could provide resources in that sense. Allowed the opportunity to temporarily integrate the team responsible for programming and handling the machines using computer numerical control, there was the possibility to witness and study different manufacturing processes, as well as to program parts for those machines, using 2 to 5 continuous axes of movement.

Given pre-existing knowledge of the CAM application used in CNC programming, there was also a focus on improving and simplifying the interaction that local programmers have with PowerMILL, through the development of auxiliary automatisms, in the form of macros.

This document aims to describe projects carried out throughout the internship that promoted an increasing acquaintance with the software, in the context of the local processes, and projects that concerned the development of automatisms directly related to the programmers' needs.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Vitor Martins Augusto, por orientar a minha dissertação e promover um primeiro contacto com o ambiente industrial, pelo apoio ao longo de toda a preparação e execução deste projeto e por ter disponibilizado, em nome da Norcam, os recursos a nível de licenciamento e formação no *software* utilizado.

Ao CEIIA, por aceitar a realização deste estágio nas suas instalações, pela forma como sempre fui recebida e por disponibilizar todos os recursos da área de programação CAM e maquinagem.

A todos os colaboradores com quem convivi no CEIIA e, em particular, ao Alberto Couto, Carlos Cruz e José Bouças, da área de “CNC”, por todo o apoio e partilha de conhecimentos.

A toda a família e amigos que me apoiaram ao longo do percurso académico.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Índice	iv
Abreviaturas e sinónimos	vii
1. Objetivos.....	1
2. Alguns aspetos sobre CNC	1
3. CEIIA	3
3.1. Equipamentos disponíveis	4
3.1.1. Centro de maquinagem vertical Awea BM 1020	4
3.1.2. Centro de maquinagem vertical Haas VF11/40.....	5
3.1.3. Robô para corte por jato de água	6
3.1.4. Robô para maquinagem de moldes.....	7
4. Formação.....	8
4.1. PowerMILL 3, 3+2 e 5 eixos.....	8
4.1.1. Maquinagem a 3+2 eixos	9
4.1.2. Movimentos posicionais e alinhamento do eixo da ferramenta	9
4.1.3. Estratégias aplicáveis ou específicas para 5 eixos	11
4.1.4. Controlo de eixos e simulação com equipamento.....	12
4.2. Linguagem de macros para PowerMILL	13
4.3. PowerMILL Robot Interface.....	13
4.3.1. Situações que podem dar origem a problemas na maquinagem	14
4.4. PowerSHAPE	15
4.5. Delcam Post Processor	15
5. Projetos desenvolvidos.....	17

5.1. Desenvolvimento de macro para geração de trajetórias 3D com redução gradual de sobre espessura, adaptada às necessidades da empresa.....	17
5.2. Desenvolvimento de macros para a otimização da programação CAM para o processo de corte por jato de água.....	18
5.2.1. Macro para programação passo a passo	18
5.2.2. Macro para escalar o modelo em Y.....	20
5.2.3. Macro para seleção de superfícies e criação de padrão.....	20
5.2.4. Macro para aplicar offset ao padrão ativo	22
5.2.5. Macro para desenhar a ferramenta de jato de água.....	23
5.2.6. Macro para criar estratégia de acabamento por padrão personalizada	23
5.3. Desenvolvimento de macros para a otimização de operações repetitivas da programação CAM no CEIIA.....	24
5.3.1. Criar no projeto de PowerMILL ferramentas com a geometria aproximada à das que existem no CEIIA	24
5.3.2. Atribuir a todos os percursos presentes no projeto de PowerMILL a mesma velocidade de movimentos rápidos	24
5.3.3. Posicionar o modelo da peça no local indicado em relação ao modelo da célula do robô.....	25
5.3.4. Personalizar a velocidade utilizada num percurso	25
5.4. Programação CAM de modelo, para maquinagem com recurso a 3 eixos, e acompanhamento da mesma no equipamento da marca Awea	27
5.5. Programação CAM de modelo, para maquinagem com recurso a 3+2 eixos, e acompanhamento da mesma no equipamento da marca Haas	34
5.6. Melhoramento de pós-processador para Haas VF11/40	40
5.6.1. Contexto inicial	40
5.6.2. Abordagem ao problema.....	41
5.7. Programação CAM de modelos para maquinagem no robô para moldes, com recurso até 5 eixos contínuos de movimento.....	45

5.8. Programação CAM de modelos a cortar com o robô de corte por jato de água e acompanhamento dos respectivos cortes	50
6. Conclusões	57
7. Referências	58
Anexos	1

ABREVIATURAS E SINÓNIMOS

CAD - *Computer-Aided Design* - Desenho assistido por computador

CAM - *Computer-Aided Manufacturing* - Maquinagem assistida por computador

CEIIA - Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel

CLData - *Cutter Location Data* - Ficheiro com informação sobre a posição da ferramenta e outros parâmetros

CM - Centro de maquinagem

CNC - *Computerized Numerical Control* - Controlo numérico computadorizado

Maquinagem - Apesar de ser também frequentemente referido como “maquinação”, foi utilizado este termo por uma questão de coerência com o estudo anterior e por ter sido o termo utilizado nas disciplinas frequentadas ao longo do MIEMM.

MDF - *Medium-Density Fiberboard* - Material derivado da madeira

MIEMM - Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

MTD - *Machine Tool Simulation file* - Ficheiro que inclui os modelos CAD de cada componente da máquina com CNC e que controla a orientação e posição de cada componente individual durante a simulação.

NC - *Numerical Control* - Controlo numérico

RTCP - *Rotation Tool Center Point* - Rotação em torno do centro da ponta da ferramenta

1. OBJETIVOS

O estágio no CELIA teve como principal objetivo o desenvolvimento de automatismos auxiliares à programação dos diversos equipamentos de controlo numérico existentes, através da linguagem de programação incluída na ferramenta CAM utilizada na empresa.

Em prol do cumprimento do objetivo primário resultou a necessidade da familiarização com o ambiente industrial, a aprendizagem da programação de células robóticas em modo “off-line”, bem como a aplicação dos conhecimentos de maquinagem adquiridos durante a disciplina de seminário, realizando projetos de maquinagem de 2 a 5 eixos contínuos.

Os projetos realizados ao longo do estágio estiveram então diretamente relacionados com a aquisição e aplicação de conceitos acerca de maquinagem com recurso a controlo numérico, sendo particularmente abordada a aplicação CAM “PowerMILL” da Delcam e as potencialidades de otimização da programação através da mesma.

2. ALGUNS ASPETOS SOBRE CNC

Entende-se que, quando um equipamento funciona por controlo numérico, recebe instruções sob a forma de código (que pode incluir números, letras e alguns outros caracteres), respondendo a essa informação de forma precisa e previsível, para efetuar as operações programadas. Para obter esse tipo de resposta, é no entanto necessário que essas instruções estejam de acordo com as especificações do equipamento, sendo agrupadas e ordenadas adequadamente. Por isso mesmo, o conjunto de instruções - denominado por programa NC - é composto por blocos de informação que são executados numa ordem sequencial bem definida. Cada um desses blocos de informação tem a si associado um número, de forma a definir a sequência do programa, e corresponde, por definição, a um ou mais comandos que permitem efetuar uma única operação no equipamento. Assumindo que um programa NC foi corretamente programado, o equipamento vai poder executar e recriar operações de maquinagem ao correr esse programa, permitindo obter peças semelhantes [1].

De forma a controlar a máquina, um programa NC deve incluir comandos que cumpram três objetivos principais [2]:

- *Posicionamento*: é necessário conhecer o sistema de coordenadas a utilizar no posicionamento, uma vez que, apesar de grande parte dos equipamentos com CNC recorrer a sistemas cartesianos tridimensionais (eixos X, Y, Z), existem equipamentos em que podem ser incluídos até 3 eixos de rotação (eixos A, B, C), que podem funcionar através da rotação da ferramenta ou da rotação da própria peça a maquinar. Quando é necessária rotação entre percursos, é ainda importante garantir que a transição do ponto final de um para o ponto inicial do outro não compromete a integridade da peça, como será posteriormente explicado neste documento [2,3];

- *Movimento*: é necessário definir o tipo de movimento a efetuar, a direção e a velocidade da ferramenta, de forma a obter resultados previsíveis [2];

- *Outras funções*: existem funções preparatórias e auxiliares que têm de ser definidas para seguir as recomendações do fabricante do equipamento ou para garantir vários aspetos como, por exemplo, qualidade superficial ou movimentação dos eixos de rotação [2].

Por sua vez, o controlo numérico computadorizado mantém o conceito descrito anteriormente, surgindo através da evolução tecnológica, que permitiu que a informação dos programas NC passasse a ser lida e guardada em ficheiros, na unidade de controlo do equipamento. Esta tecnologia, aplicada especificamente à maquinagem, surgiu como resposta a dificuldades em obter componentes complexos e com tolerâncias apertadas que pudessem ser reproduzíveis. Tendo em conta que esses problemas, na maquinagem convencional, ocorrem frequentemente na troca e medição de ferramentas e quando são necessárias modificações de posição da peça, pode ser recomendável minimizar também esse tipo de operações na maquinagem com CNC, em prol de um melhor desempenho [1].

É ainda de salientar que, no caso particular em que são necessárias modificações de amarração, se acaba por introduzir a possibilidade de variação humana e perda de repetibilidade de resultados, aumentando também, de forma considerável, o tempo de preparação da maquinagem; isto porque uma modificação da fixação do componente a maquinar implica, para além do trabalho físico de fixação, a obtenção

de novos pontos de referência antes de poder efetuar novas operações. No fundo, de acordo com os indicadores de produtividade para a operação em questão (menor tempo, mínimo número de amarrações, menor desgaste das ferramentas, melhor qualidade superficial, etc), podem ser escolhidas diferentes abordagens para maquinar uma mesma peça [1,2,4,5].

3. CEIIA

O CEIIA, inicialmente projetado como Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel, tem evoluído no sentido de ampliar a sua aplicação em diversas indústrias relacionadas com os aspetos de mobilidade. Também graças à disponibilidade de equipamentos e conhecimento em diversas tecnologias, em termos de produção, dedica-se principalmente à conceção de protótipos e peças únicas ou de pequena série, o que, pelo menos a nível de maquinagem, acaba por implicar uma constante necessidade de utilização de métodos diferentes de peça para peça.

Apesar do CEIIA se dividir em diversas áreas na parte de produção, no contexto do estágio em questão, justificou-se um contacto mais próximo com a equipa de “CNC”, que está responsável pela programação CAM e manipulação dos equipamentos destinados a maquinagem com recurso a controlo numérico. Adicionalmente, esta equipa tem também um parecer importante na elaboração de orçamentos e averiguação da viabilidade de produção, comunicando frequentemente com outras equipas internas, como as de projeto, CAD e compras.

Especificamente na área de maquinagem com utilização de controlo numérico, existem recursos a nível de *software* e equipamento que tornam possível a opção entre diferentes abordagens para obter peças. Nomeadamente, a nível de *software* estão disponíveis:

- **Catia** - Aplicação CAD da Dassault Systèmes que, não sendo utilizada maioritariamente na fase de maquinagem, dá um apoio fulcral na perceção da geometria global da peça ou conjunto de peças, facilitando a comunicação com a equipa de modelação CAD e permitindo adicionar componentes ao modelo que sejam úteis, por exemplo, na fixação do bloco [6];

- **Delcam Exchange** - Aplicação específica para a conversão de ficheiros CAD, que permite a interação entre a aplicação CAD e a aplicação CAM existentes. Para além de poder funcionar separadamente, pode ainda correr em segundo plano quando é importado no PowerMILL um modelo CAD que não seja compatível, convertendo-o para um formato Delcam (ddx, dgk ou dmt) [7];
- **PowerMILL** - Aplicação CAM da Delcam para programação da maquinaria assistida por computador, sendo por isso uma ferramenta de trabalho constantemente utilizada nos projetos que passam por esta área. É através desta aplicação que é gerada a informação a incluir nos programas NC que, quando pós-processados, podem correr nos equipamentos com CNC [8];
- **PowerMILL Robot Interface** - Sistema de programação de robôs, que funciona como *plug-in*, que pode ser ativado na aplicação CAM. Permite, ao importar dados de um robô disponível, obter simulações dos percursos gerados no projeto de PowerMILL, auxiliando o ajuste de parâmetros de simulação e a programação “off-line” do robô [9];
- **Delcam Post Processor** - Aplicação para pós-processar programas NC, através da qual é também possível criar e editar pós-processadores, sem ter de recorrer a editores de texto externos [10].

3.1. EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS

3.1.1. Centro de maquinaria vertical Awea BM 1020

Utilizado para maquinaria com recurso a 3 eixos, para peças que estejam dentro dos limites de alcance dos eixos, estando normalmente destinado a peças que não exijam refrigeração com água (por uma questão de redução de tempo de preparação). No que toca a amplitude de movimentação de eixos, tem um intervalo de 1020 mm ao longo do eixo X, 600 mm ao longo do eixo Y e 600 mm ao longo do eixo Z, o que significa que o bloco a maquinar é limitado a essas dimensões (tendo ainda de ser tida em conta a fixação do mesmo). Na figura 1 pode ser visto o equipamento, juntamente com uma orientação aproximada dos eixos de movimento (ao considerar a origem na mesa) [11].

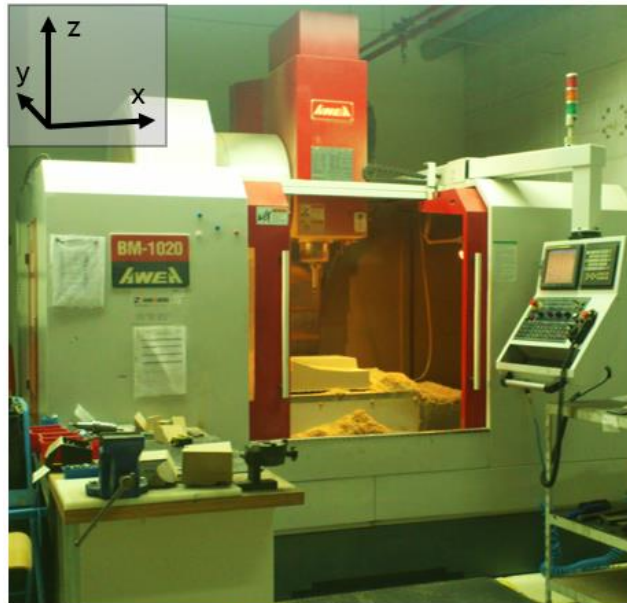


Figura 1 - Centro de maquinagem vertical com 3 eixos de movimento: modelo BM-1020, da marca Awea.

3.1.2. Centro de maquinagem vertical Haas VF11/40

Utilizado essencialmente para maquinagem com recurso a 3 eixos, este equipamento pode ser adaptado com um prato divisor, que acrescenta eixos de inclinação (A) e de rotação (B). Para além de situações em que é necessário utilizar mais de 3 eixos, é escolhido em relação ao centro de maquinagem Awea quando as peças são maiores ou quando é necessária refrigeração com água. Em termos de amplitude de movimentos, pode deslocar-se 3048 mm ao longo do eixo X, 1016 mm ao longo do eixo Y e 762 mm ao longo do eixo Z, sendo a disposição dos eixos semelhante à do CM da marca Awea (ver figura 2) [12].



Figura 2 - Centro de maquinagem vertical com recurso a 3 eixos: modelo VF11/40 da marca Haas.

Ao montar o divisor na mesa, o tamanho do bloco a maquinar é restringido, uma vez que o aperto tem de ser feito na área do prato e o movimento dos eixos não pode interferir com a integridade da peça ou do equipamento. O modelo do CEIIA (Haas TR310), presente na figura 3, tem um prato circular com 310 mm de diâmetro, possuindo uma inclinação máxima de 120° (em torno do eixo X) e uma amplitude de rotação de 999,999° (em torno do eixo Z) [13].

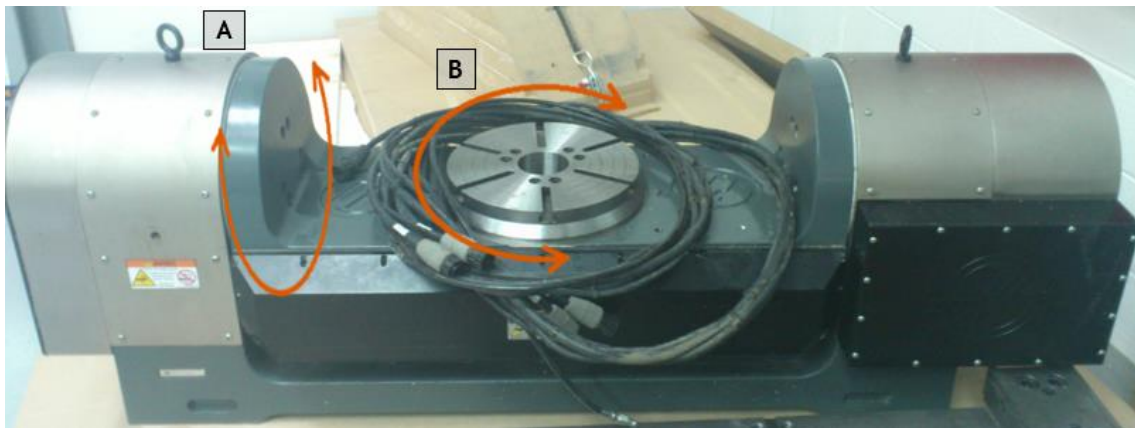


Figura 3 - Prato divisor (modelo Haas TR310) que é montado no centro de maquinagem; a direção aproximada dos eixos A e B está também representada na figura.

É ainda importante salientar que o equipamento não tem compensação da ponta da ferramenta (sem RTCP), o que implica cuidados a nível da programação CAM, de forma a obter programas NC para maquinagem com 3+2 ou 5 eixos, que não deem origem a problemas de posicionamento. No contexto do CEIIA, o divisor é utilizado principalmente para maquinagem com 3+2 eixos, na qual são programadas estratégias em que se utilizam apenas os eixos lineares (X, Y e Z), tendo os 2 eixos de rotação (neste caso A e B) fixos. No fundo, o prato divisor é montado sobretudo quando surgem modelos que a 3 eixos implicariam mudanças de amarração [14].

3.1.3. Robô para corte por jato de água

Robô Motoman HP20, com 6 eixos, alcance vertical de 3063 mm, alcance horizontal de 1717 mm e repetibilidade $\pm 0,06$ mm. É utilizado um controlador DX100, com entrada USB para passagem de programas. Adicionalmente, o equipamento está adaptado para a utilização de um fluxo de água e abrasivo (neste caso até 4000 bar de pressão) como ferramenta de corte, sendo o diâmetro do cone formado pelo fluxo de 0,761 mm quando atinge a superfície (posicionada a 1,5 mm de altura da ponta da ferramenta). Tal como é possível ver na figura 4, devido às particularidades do processo, são necessários vários equipamentos para além do

robô, como um purificador de água, uma máquina de alta pressão, um dispensador de abrasivo e um tanque de água com uma grelha de suporte [15].

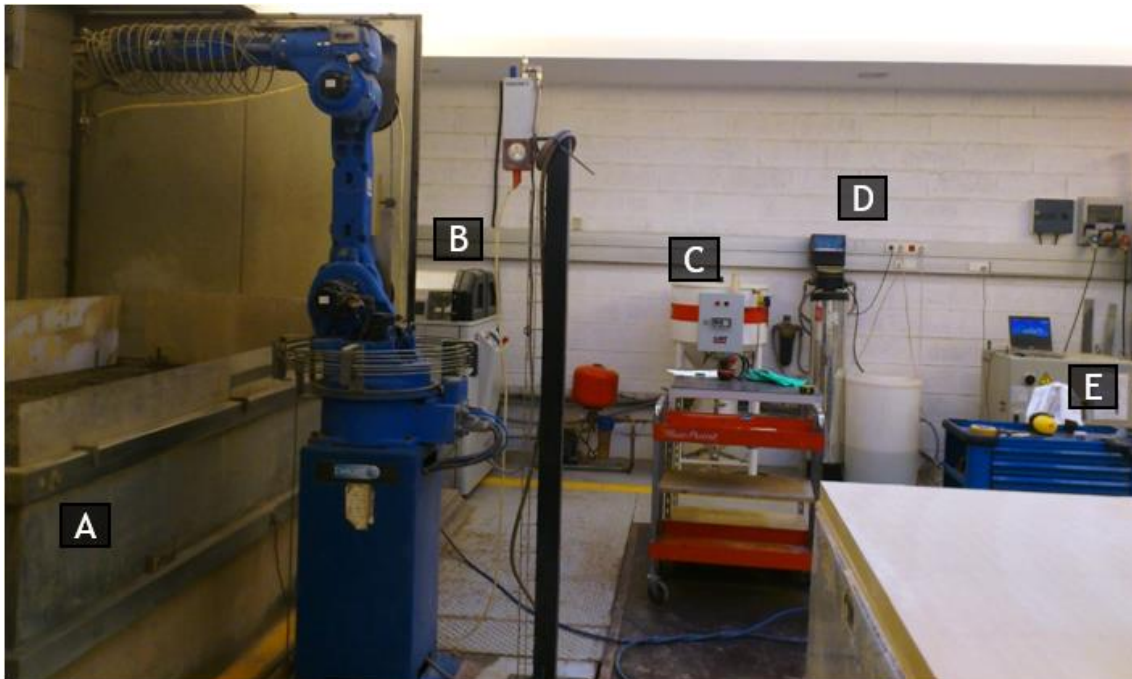


Figura 4 - Robô para corte por jato de água: modelo HP20 da marca Motoman. Para o processo, para além do robô e fonte de energia (E), é utilizado equipamento extra: tanque de água com grelha de suporte (A); máquina para controlar a pressão de água (B); reservatório de abrasivo (C); purificador de água (D).

Especificamente no contexto do CEIIA, é importante referir que foram detetadas diferenças entre a dimensão real e a dimensão que é admitida no controlador do robô, ao observar que em maquinagem bidimensional os furos obtidos eram elípticos em vez de circulares. Dado este problema e tendo em conta que a discrepância se dava sempre ao longo do eixo das ordenadas, foi quantificada a diferença entre a distância que o robô percorria ao proceder a uma deslocação de 100 mm em Y e o comprimento efetivo dessa distância. Através dessa medição, chegou-se à conclusão de que é necessário fazer, nesse eixo, uma compensação linear de 1,0032 da medida da cota, para obter o resultado pretendido.

3.1.4. Robô para maquinagem de moldes

Robô Motoman ES165D, com 6 eixos, alcance vertical de 3372 mm, alcance horizontal de 2615 mm e repetibilidade $\pm 0,2$ mm. Tal como para o outro robô é utilizado um controlador DX100, sendo neste caso utilizadas diferentes ferramentas, de acordo com as operações de corte. Para usufruir da capacidade do robô são ainda utilizados equipamentos como uma mesa de apoio para colocar os blocos a maquinar e um sistema de aspiração de pó resultante da maquinagem (visíveis na figura 5). Em

breve deverá ainda ser montado um eixo de deslocação linear, permitindo aumentar o alcance horizontal, que se trata do limite mais frequentemente atingido no contexto dos projetos do CEIIA [16].

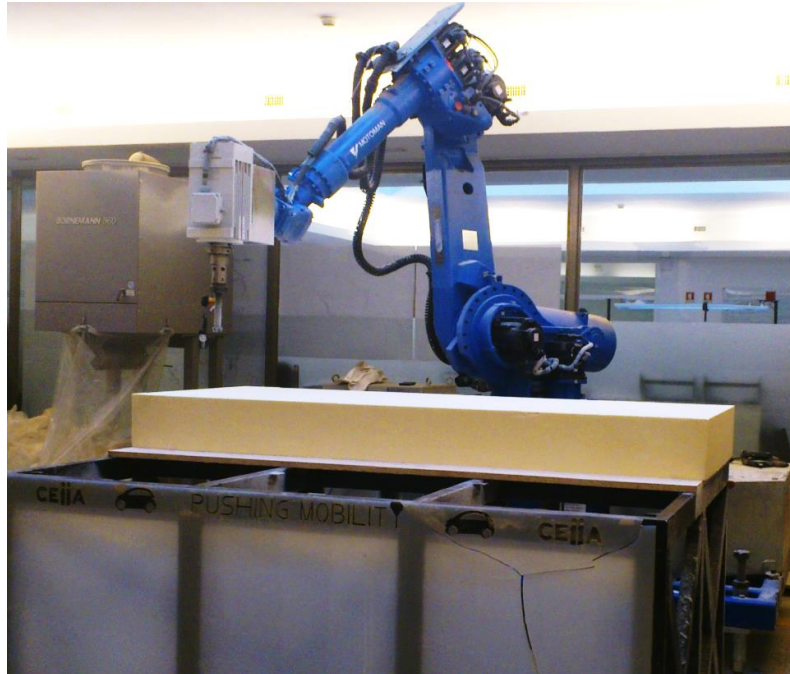


Figura 5 - Robô para maquinagem de moldes: modelo ES165D da marca Motoman.

Quanto ao sistema de aspiração, é ainda importante salientar que funciona através das ferramentas que têm canais próprios para o efeito. Por isso mesmo, para alguns materiais, acaba por ter um papel relevante na fase de desbaste, durante a qual é feita a remoção da maior parte do material, e na qual são utilizadas ferramentas com essas características (ver figura 1-A em anexo).

4. FORMAÇÃO

4.1. POWERMILL 3, 3+2 E 5 EIXOS

Num contexto anterior ao estágio abordado neste documento, houve um contacto mais próximo com as funcionalidades da aplicação CAM aplicadas especificamente a programação de maquinagem com recurso a 3 eixos. O estudo em questão surgiu do interesse em adquirir competências para a compreensão e desenvolvimento de macros para PowerMILL, mas também do interesse em compreender as funções da aplicação a nível de 3 eixos, para eventualmente estudar a utilização de mais eixos de movimento, tendo desde logo conhecimentos de base. Por isso mesmo, no relatório que resultou dessa abordagem [17], são descritos os principais parâmetros,

entidades, ferramentas auxiliares, estratégias e resultados que surgem num projeto de PowerMILL.

No âmbito do estágio, dadas as condições disponíveis no CEIIA a nível de equipamento, foi seguido o curso de formação da Delcam em PowerMILL para 5 eixos, com o intuito de poder acompanhar a programação CAM e posterior maquinagem com recurso a mais de três eixos.

4.1.1. Maquinagem a 3+2 eixos

Em relação à maquinagem a 3 eixos, este processo apresenta a vantagem de poder utilizar orientações diferentes do eixo da ferramenta, sem implicar vários *set-ups* (posicionamento e fixação) do bloco a maquinar [3].

Para passar de maquinagem com 3 eixos para 3+2, é acrescentado ao centro de maquinagem um divisor (montado na cabeça ou na mesa) de forma a realinhar a ferramenta, utilizando rotação, antes de seguir com operações em X, Y e Z. De acordo com essa metodologia, o que é normalmente feito a nível de programação CAM é criar, para cada reorientação da ferramenta, planos de trabalho alinhados com a nova orientação, definindo depois estratégias com recurso a 3 eixos [3].

Uma vez que no final da programação são obtidas várias referências de posição, é necessário prestar atenção à transição entre elas e à definição da referência que deve ser utilizada no programa NC, que pode ter de corresponder à posição do ponto em relação ao qual se dá a rotação dos eixos A e/ou B e/ou C. Devido à inclusão de eixos de rotação, estes aspetos são particularmente importantes na fase de pós-processamento de programas NC, sendo mesmo necessário configurar o pós-processador para o CM a que o programa se destina, de forma a que as transições obtidas não comprometam a integridade da peça. A questão do pós-processamento para maquinagem com 3+2 eixos será posteriormente abordada [3].

4.1.2. Movimentos posicionais e alinhamento do eixo da ferramenta

Para além dos cuidados a ter também na programação a 3 eixos, quando são utilizados diferentes planos de trabalho (sistemas com 3+2 ou 5 eixos contínuos), torna-se necessário reconhecer que a aplicação CAM não efetua verificações de colisão/invasão aos movimentos posicionais necessários na transição de uma referência para a outra. Por isso mesmo, passa pela responsabilidade do utilizador

garantir que as posições inicial e final de cada percurso não resultam em intersecções com o modelo ou com partes do bloco por maquinar [3].

No entanto, uma vez que através da aplicação nem sempre é possível ter controlo dos restantes movimentos que garantem a transição entre planos de trabalho, é necessário conhecer o efeito do ficheiro de pós-processador disponível, para gerar movimentos de transição sem risco de colisão/invasão. Isto porque, no que toca a movimentos posicionais, o pós-processador pode atuar de duas formas [3]:

- Inserindo no início e fim de cada percurso a posição máxima de Z (posição “home”) da máquina: o que significa que não é necessário definir planos de trabalho intermédios no projeto de PowerMILL para garantir que não há colisão nas rotações [3];
- Não definindo o regresso à posição máxima em Z: o que significa que se torna responsabilidade do utilizador criar um conjunto de planos de trabalho que defina o percurso a seguir durante a rotação [3].

Ao contrário do que acontece nos movimentos posicionais, quando o próprio percurso envolve a movimentação dos eixos de rotação, a análise de colisões/invasões é aplicável. No entanto, é necessário adaptar as estratégias utilizadas para permitirem um alinhamento diferente do eixo da ferramenta, já que, por defeito, é selecionada a orientação vertical. Para além desta opção, existem alternativas como a utilização de ângulos específicos de aproximação/inclinação ou de uma direção fixa, tornando possível adaptar estratégias de 3 eixos para 5 eixos ou obter diferentes resultados para uma mesma estratégia de 5 eixos contínuos [3].

Paralelamente à definição da orientação do eixo da ferramenta, é ainda possível personalizar vários parâmetros, como os limites de variação do eixo. Esta definição em particular acaba por se tornar bastante útil quando se pretende reduzir a amplitude de movimentos da ferramenta. A título de exemplo, na verificação de colisões/invasões é utilizada a informação do suporte e da haste da ferramenta mas não é tida em conta a geometria e cinemática do restante equipamento; a limitação dos ângulos azimutal e de elevação (ver figura 2-A em anexo) que o eixo da ferramenta pode assumir pode ser uma solução para esse problema [3].

Para além de poderem ser definidas antes de calcular a estratégia, estas definições podem ainda ser aplicadas retrospectivamente, através das ferramentas de edição de percursos. Essa função acaba por se tornar vantajosa, por exemplo, para comparar os efeitos da orientação do eixo de ferramenta na simulação com o modelo CAD do equipamento ou para redefinir a orientação apenas numa área específica [3].

4.1.3. Estratégias aplicáveis ou específicas para 5 eixos

4.1.3.1. Acabamento por projeção de superfície

Tendo uma superfície de referência, é feita uma projeção, ao longo da normal da mesma, no componente. Essa superfície, obtida através de aplicações CAD com modelação de superfícies, pode não corresponder, corresponder em parte ou até na totalidade à forma do componente, devendo ter transições o mais suaves possível, uma vez que o passo lateral da estratégia é definido por unidades de distância ou divisão paramétrica entre curvas definidas pela superfície. Existem ainda outras opções de modificação do efeito da estratégia como a direção de projeção (para dentro ou para fora), direção de padrão (ao longo ou transversalmente) ou canto inicial do padrão. No contexto de maquinagem com mais de 3 eixos, é ainda importante definir a forma de alinhamento da ferramenta [3].

4.1.3.2. Acabamento por padrão embutido

Aplicada em contextos multieixo de ferramenta, ao ter um padrão embutido como referência, é possível através desta estratégia obter percursos em que o eixo da ferramenta é alinhado com a normal à superfície em que o padrão foi aplicado. A forma de projeção do padrão no modelo é, por sua vez, definida pelo utilizador que, ao embuti-lo, o pode escolher fazê-lo ao longo do eixo Z ativo ou no ponto mais próximo ao modelo [3].

4.1.3.3. Acabamento *swarf*

Em relação a outras, as estratégias do tipo *swarf* destacam-se por ser utilizado o lado da ferramenta para maquinar. Por isso mesmo, para uma superfície ser sujeita a acabamento *swarf*, é necessário que a ferramenta possa estar em total contacto com a superfície ao longo de toda a profundidade de corte. Como existem superfícies em que, mesmo após o ajuste de definições de eixo da ferramenta, tal não acontece, é por vezes contornada a questão da qualidade superficial, sendo feito um acabamento *swarf* entre duas curvas (modelos de arame correspondentes ao topo e

base), em vez de ser utilizada a superfície como referência. Nesses casos em que o *swarf* deveria ser aplicável a uma superfície mas se torna necessário utilizar modelos de arame, a mesma deve ser definida como parte do modelo a ignorar (utilizando as opções de sobre espessura), para não interferir no cálculo da estratégia [3].

4.1.3.4. Acabamento linha de fluxo

Neste tipo de estratégia, ao utilizar um mínimo de quatro curvas como guia, o passo lateral da ferramenta é definido independentemente da geometria do modelo a maquinar, obtendo-se o mesmo espaçamento ao longo de todo o percurso. Também por ser definida uma superfície virtual que substitui o modelo nas definições, a região a maquinar não precisa de corresponder necessariamente a uma só superfície [3].

4.1.3.5. Acabamento em espiral paramétrica

Através da definição de um padrão e de superfícies que limitam o final da estratégia, é possível calcular um percurso em espiral entre os dois [3].

4.1.3.6. Estratégias para aplicações específicas

- *Acabamento rotativo*: especificamente quando é montado um eixo rotativo na máquina, é possível utilizar este tipo de estratégia para operações em 3 eixos, enquanto o componente é rodado ao longo do eixo X [3].

- *Estratégias para maquinar portas*: numa estratégia para portas, é assumido um realinhamento da ferramenta, de forma a atingir as zonas mais internas da porta [3].

- *Estratégias para maquinar turbinas*: definindo diferentes zonas da turbina, estas estratégias criam percursos específicos para a zona das lâminas [3].

4.1.4. Controlo de eixos e simulação com equipamento

Em percursos que envolvem a utilização de mais de 3 eixos, mesmo que a análise de colisões não apresente problemas em relação à haste e suporte da ferramenta, é necessário ter em conta que parte do equipamento se moverá para poder realinhar o eixo da ferramenta. Por isso mesmo, pode tornar-se útil utilizar um ficheiro MTD do equipamento na simulação de percursos, de forma a identificar colisões visualmente. De forma a tornar este tipo de verificação o mais eficaz possível, é importante que esse ficheiro represente adequadamente o equipamento em termos dimensionais, estando também, em termos de cinemática, em sintonia com o ficheiro de configuração do pós-processador [3].

Caso surjam situações indesejadas na simulação, é ainda possível limitar o movimento dos eixos do equipamento, aplicado especificamente a esse percurso, através do ajuste de definições do percurso [3].

4.2. LINGUAGEM DE MACROS PARA POWERMILL

Tal como referido anteriormente, a compreensão e desenvolvimento de macros foi abordada num documento anterior, que ajudou na preparação do estágio no CEIIA. Uma vez que a linguagem de programação foi já alvo de estudo, as referências a macros ao longo da descrição de projetos que se segue são feitas com a assunção de que as considerações sobre este tema podem ser consultadas no documento em questão [17]. Ou seja, a descrição de projetos é feita no sentido de elucidar funções e necessidades que levaram ao desenvolvimento de macros e não no sentido de elucidar as questões técnicas envolvidas no desenvolvimento das mesmas.

No âmbito do desenvolvimento de macros para o estágio no CEIIA foram frequentemente consultados o guia de programação de macros para PowerMILL [18] e o fórum de discussão da Delcam [19], que contribuíram para o esclarecimento de dúvidas e aprofundamento de conhecimentos nesta área.

4.3. POWERMILL ROBOT INTERFACE

Apesar de recorrer a estratégias de remoção de material semelhantes às utilizadas em centros de maquinagem, a programação “off-line” de robôs exige simulações mais complexas, com base nas quais devem ser escritos os programas NC para o equipamento. Essa necessidade de conversão de percursos em movimentos robóticos surge também no sentido de analisar e obter a melhor simulação possível, para evitar problemas como singularidades e ultrapassagem dos limites de eixos, que podem dar origem a movimentos imprevisíveis por parte do equipamento. A localização, designação e variação de movimento dos eixos presentes num robô industrial de 6 eixos estão esquematizadas na figura 3-A em anexo [20].

De forma a acompanhar a programação CAM dos robôs disponíveis no CEIIA e a poder utilizar os recursos de simulação para a mesma, houve então interesse em consultar, no contexto de alguns projetos, o documento da Delcam relativo ao *plugin* para programação de robôs, que é possível incluir no PowerMILL. Nesse documento é compilada informação acerca de tópicos como [20]:

- **Recriação do ambiente do robô:** é possível carregar no projeto o modelo CAD e configurações do equipamento disponível, podendo incluir, para além do robô, elementos extra que alteram ou restringem a movimentação de eixos (como mesas de apoio, plataformas, eixos lineares, mesas rotativas, etc.). É ainda importante referir que, depois de carregar a célula robótica (o conjunto de elementos mencionado acima), é necessário definir a posição da mesma em relação à peça a maquinar [20];
- **Ferramentas de análise e limitação de simulação:** ao simular com um robô no projeto de PowerMILL, é possível ajustar, por exemplo, a prioridade e limites dos eixos de movimento. Para além disso, é possível visualizar graficamente a variação da posição de eixos ao longo da simulação e verificar se foram detetadas singularidades ou alcançados limites de eixo. Uma grande parte das vezes, para obter resultados favoráveis, é apenas necessário ajustar parâmetros de simulação [20];
- **Calibração de ferramentas e do *spindle*:** ao atualizar as informações de calibração do *spindle* associadas à célula robótica no PowerMILL Robot Interface, é possível contemplar a utilização de ferramentas no robô de forma semelhante a um CM com CNC. Após a calibração, na qual se obtém a localização exata do ponto de encaixe da ferramenta (centro do *spindle*, cuja direção define o eixo da ferramenta) em relação ao plano de trabalho da cabeça do robô (6º eixo), passa a ser, a nível do controlador do robô, apenas necessário registar o comprimento da ferramenta para a poder utilizar [20].
- **Ferramentas avançadas e personalização:** tal como para um CM, existe a possibilidade de personalizar a programação, por exemplo, utilizando macros auxiliares e criando parâmetros de utilizador, ou mesmo os programas NC gerados, modificando parâmetros no pós-processador [20].

4.3.1. *Situações que podem dar origem a problemas na maquinagem*

Em conformidade com o que foi referido anteriormente, uma simulação deve ser analisada (e modificada se possível) de forma a evitar singularidades e propensão a exceder os limites dos eixos. A lógica por trás dessa metodologia vem do conhecimento de que, apesar de uma simulação parecer aceitável em termos de colisões/invasões num projeto de PowerMILL, essa situação pode não corresponder à realidade quando estão presentes singularidades; isto porque uma singularidade é,

por definição, uma dificuldade do mecanismo interno do robô em movê-lo para a posição seguinte, se o mesmo se encontrar numa de três posições específicas [20].

A partir dessas posições específicas, resumidas na tabela 1-A em anexo, podem surgir movimentos imprevisíveis por não existir solução ou por existir mais do que uma solução para o robô se mover para o ponto seguinte. Por vezes, para evitar estas situações, torna-se necessário afinar não só a simulação, como o próprio percurso a simular. Nesse sentido, a utilização da aplicação sob a forma de *plug-in* no PowerMILL torna-se bastante prática para editar retrospectivamente os percursos [20].

4.4. POWERSHAPE

No contexto de uma disciplina do MIEEM, foram adquiridos conhecimentos acerca desta aplicação da Delcam, que se destina à modelação CAD de superfícies e sólidos. Especificamente no estágio no CEIIA, foram utilizados e lembrados alguns desses conhecimentos para interagir com a aplicação CAM. Por já existirem conhecimentos de base, a nível de formação, para poder realizar essas operações, foram apenas seguidos tutoriais disponíveis na aplicação [21].

Tendo em conta que, em algumas estratégias disponíveis em PowerMILL, é possível utilizar superfícies de referência para afinar os parâmetros da estratégia, essa foi uma das principais aplicações deste *software*. Por outro lado, por existir alguma incompatibilidade ao converter modelos inicialmente criados em Catia, foi também esporadicamente necessário modificar superfícies do modelo em PowerSHAPE para poder utilizar o mesmo no PowerMILL. Neste tipo de situação, não tendo disponível o PowerSHAPE, seria muito provavelmente necessário jogar com diferentes tolerâncias na conversão com o Delcam Exchange ou mesmo entrar em contacto com a equipa de CAD para tentar modificar o modelo.

4.5. DELCAM POST PROCESSOR

Através da aplicação CAM são recolhidas informações e planeada a maquinaria de componentes. No entanto, ao criar um “programa NC” em PowerMILL (termo representado na aplicação), o mesmo não pode ser diretamente corrido num equipamento CNC, sendo necessário organizar a informação de forma a poder ser lida pelo controlador do mesmo. Para proceder ao tratamento de dados, os ficheiros gerados em PowerMILL, que dão informação sobre a posição da ferramenta e

parâmetros de corte - ficheiros CLData - são traduzidos de acordo com as configurações do equipamento a que se destinam, através de um programa conhecido como pós-processador. A forma como o ficheiro resultante é escrito está então diretamente relacionada com um ficheiro de configuração (designado como *option file*), cuja função é transmitir ao programa a forma como o ficheiro NC deve ser escrito para um equipamento específico. De acordo com essa premissa, um único ficheiro CLData pode ser pós-processado para vários equipamentos diferentes, sendo apenas necessário adaptar o ficheiro de configuração utilizado [10,22].

As versões mais recentes do PowerMILL têm vindo a ser otimizadas para a escrita de programas NC através do programa Delcam Post Processor (que utiliza ficheiros de configuração com extensão .pmoptz), apresentando algumas funções que não são suportadas ao utilizar o DuctPost (que utiliza ficheiros de configuração com extensão .opt) para o mesmo efeito. Nesse sentido, é promovida a substituição de pós-processadores “.opt” por pós-processadores “.pmoptz”, ainda mais quando seria de qualquer forma necessário modificar o ficheiro de configuração utilizado. Isto porque, enquanto que em termos de pós-processamento através de PowerMILL, a única diferença para o utilizador passa por escolher um ficheiro de extensão diferente, em termos de edição de ficheiros de configuração, a utilização do Delcam Post Processor pode fazer uma grande diferença para o programador [10].

A edição de ficheiros de configuração com extensão “.opt” constitui frequentemente uma dificuldade por depender de editores de texto externos, condições definidas pelo programador inicial e por ser difícil conhecer a amplitude do efeito que pequenas mudanças podem gerar nos ficheiros pós-processados. Tendo isso em conta, a aplicação Delcam Post Processor permite gerar e editar ficheiros de configuração, visando simplificar o processo, ao permitir, por exemplo, identificar que definição dá origem a um determinado valor no ficheiro NC, desde que o ficheiro CLData tenha sido pós-processado em modo de depuração, através da aplicação [10].

No âmbito de um dos projetos desenvolvidos no estágio, tornou-se útil adquirir alguns conhecimentos básicos acerca desta aplicação, sendo por isso seguido o curso de formação da Delcam sobre a mesma. Nesse documento, são abordadas questões pertinentes para entender as considerações a ter ao desenvolver um ficheiro para configurar o pós-processador, o tipo de elementos que devem estar presentes, a

interação com a aplicação CAM e as possibilidades de edição através desta aplicação específica. Por se tratar de um assunto relativamente complexo e extenso, as informações com particular interesse para o estágio serão abordadas no contexto do projeto que suscitou a utilização desta aplicação [10].

5. PROJETOS DESENVOLVIDOS

5.1. DESENVOLVIMENTO DE MACRO PARA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS 3D COM REDUÇÃO GRADUAL DE SOBRE ESPESSURA, ADAPTADA ÀS NECESSIDADES DA EMPRESA

Aproveitando para dar continuidade ao tema abordado no seminário [17], realizado no primeiro semestre do ano letivo de 2014/15, e respondendo ao mesmo tempo a algumas necessidades da programação CAM utilizada no CEIIA, foi desenvolvida uma macro para gerar cópias de um percurso de PowerMILL, às quais são atribuídas sobre espessuras gradualmente menores.

Tendo por base a macro desenvolvida anteriormente, foram feitos alguns ajustes adaptados ao que era pedido pelos programadores do CEIIA. Nomeadamente:

- Foi incluída a possibilidade de aplicar a macro a percursos já calculados;
- Passaram a estar incluídas caixas de diálogo para indicar valores de sobre espessura máxima e mínima das cópias, bem como de incremento a utilizar (na macro original eram pedidos a sobre espessura inicial e o passo lateral);
- As cópias geradas passaram a ser ordenadas por sobre espessura decrescente, em vez de manterem a ordem pela qual eram criadas.

Este tipo de macro tem uma aplicação particular em casos em que duas ou mais peças têm de encaixar. Nessas situações, é necessário acertar as cotas de cada uma das peças não só tendo em conta as dimensões e tolerâncias presentes no desenho 2D da peça, mas também as variações que podem posteriormente levar a folgas ou a dificuldades de encaixe entre peças. Por isso mesmo, para zonas críticas, torna-se frequente gerar múltiplas trajetórias com sobre espessuras decrescentes, de forma a maquinar sequencialmente uma das peças, até atingir exatamente o tipo de encaixe pretendido com a(s) outra(s). No caso do CEIIA, é por vezes requerida nesta fase de verificação a presença do responsável pelo projeto, para além do responsável pela maquinaria.

5.2. DESENVOLVIMENTO DE MACROS PARA A OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO CAM PARA O PROCESSO DE CORTE POR JATO DE ÁGUA

Tendo em conta que, na realidade do CEIIA, a grande maioria das peças cortadas por jato de água se trata de figuras a recortar de placas de espessura relativamente pequena (máximo de 30, 40 mm), são utilizados de forma recorrente alguns passos e estratégias na fase de programação CAM. Nesse contexto, surge o interesse em desenvolver macros que agilizem a programação repetitiva. Para esse fim, foram desenvolvidas ao longo do estágio macros para operações individuais e, em particular, uma macro que junta os principais passos que permitem programar um modelo a cortar por este processo, recorrendo a estratégias bidimensionais.

5.2.1. Macro para programação passo a passo

Por se tratar de um ficheiro extenso e por ser útil manter as macros para operações individuais, a macro geral remete para as outras, recorrendo a decisões do utilizador para seguir ou não todas as operações envolvidas na programação da grande maioria dos modelos. Na figura 6 é esquematizado o conjunto de operações desta macro, que será abordado de seguida.

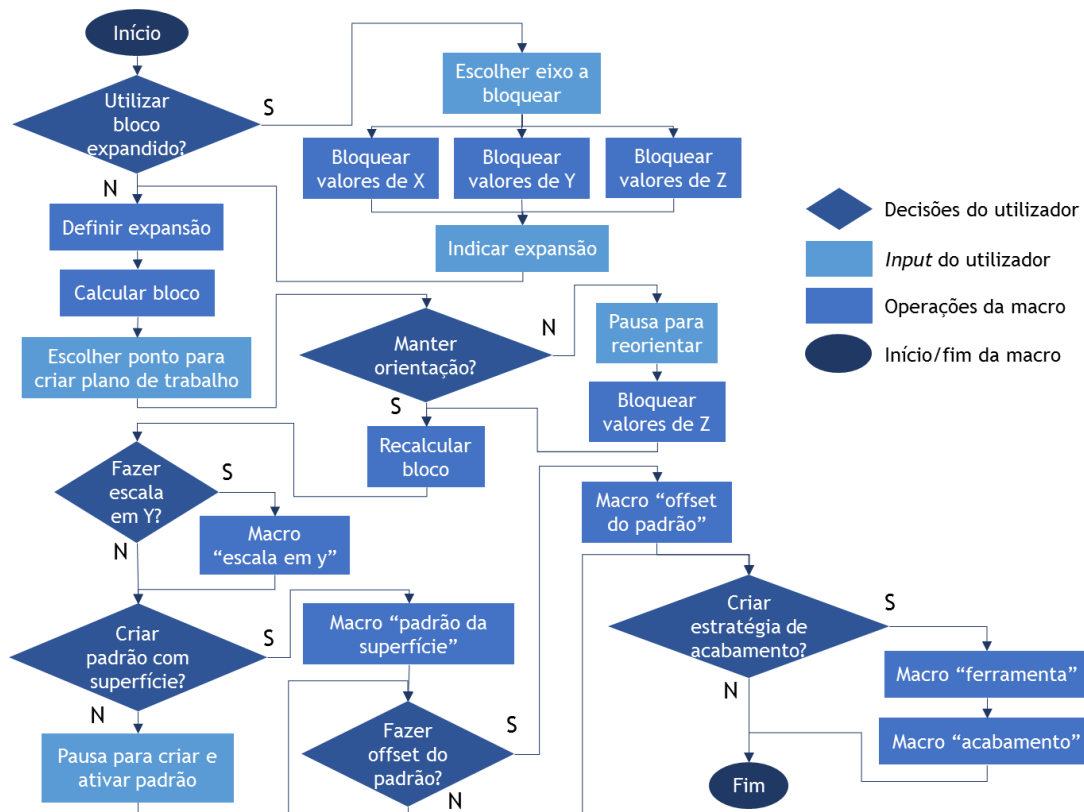


Figura 6 - Fluxograma representativo dos comandos incluídos na macro para programação passo a passo. Dependendo de escolhas positivas "S" ou negativas "N", os comandos executados diferem.

A nível de programação CAM, é inicialmente criado um plano de trabalho, alinhado com a superfície do topo do modelo, a partir de um bloco. Na macro, é nesse sentido questionado ao utilizador se pretende utilizar uma expansão (diferente de zero) para calcular esse bloco e qual o eixo a bloquear caso o faça (correspondente à espessura da chapa). Seguidamente, é calculado o bloco e feita uma pausa na macro, para permitir ao utilizador escolher o ponto do bloco onde será criado o plano de trabalho. Uma vez que nem sempre o plano de trabalho criado tem a orientação de eixos desejada, é ainda questionado ao utilizador se pretende manter a orientação do plano e, caso a resposta seja negativa, é feita uma pausa na macro para permitir a transformação do mesmo. Nesta operação em particular, a interação do utilizador torna-se difícil de minimizar, por depender bastante da forma como o modelo CAD é importado e da orientação original do mesmo. Tendo o plano de trabalho devidamente orientado, é recalculado o bloco de acordo com as definições de expansão, sendo nesta fase admitido que os limites a bloquear, correspondentes à espessura da placa, estão incluídos no eixo Z.

Após as operações descritas, restam relativamente poucos comandos executados diretamente através desta macro, sendo a mesma utilizada para encadear as várias etapas do processo, permitindo filtrar as macros a correr, de acordo com as opções do utilizador:

- Devido à questão da discrepância na movimentação do robô, é questionado ao utilizador se pretende escalar o modelo para fazer a compensação linear - *macro para escalar o modelo em Y*;
- Uma vez que é quase sempre utilizada uma estratégia de acabamento por padrão, é necessário criar um padrão através do modelo, normalmente correspondente a toda a superfície do topo. Por isso mesmo, é questionado ao utilizador se pretende criar um padrão desse tipo, - *macro para seleção de superfícies e criação de padrão* - sendo feita uma pausa na macro para criar e ativar um padrão personalizado, caso a resposta seja negativa;
- Dado que existe um diâmetro admitido para o jato de água ao atingir a superfície, o padrão utilizado na estratégia não deve corresponder a 100% à geometria do modelo, para evitar erros dimensionais. Assim sendo, é questionado ao utilizador se será feito um *offset* do padrão ativo - *macro para aplicar offset ao padrão ativo*;

- Por último, é dada ao utilizador a opção de criar uma estratégia de acabamento por padrão com os parâmetros adaptados para o que é normalmente utilizado no CEIIA para este processo. Caso a resposta seja positiva, são corridas macros para *desenhar a ferramenta de jato de água e criar a estratégia de acabamento por padrão*.

5.2.2. Macro para escalar o modelo em Y

Após a contemplação da opção de fazer a compensação linear ao nível do controlador do robô, chegou-se à conclusão de que teria de envolver um programa interno, feito pela marca do robô. Por uma questão de simplificação, acabou por se optar por fazer a compensação através de uma escala do modelo no PowerMILL. De acordo com as medições efetuadas para quantificar o problema de movimentação, é utilizado o valor de 1,0032 numa expansão do modelo em Y. No entanto, a macro foi redigida de forma a que, de acordo com a resposta do utilizador, possa ser utilizado um valor diferente, caso seja necessário. Uma vez que a expansão se dá apenas ao longo de um eixo específico, é fulcral que o plano de trabalho desejado já esteja definido e ativo para funcionar corretamente.

5.2.3. Macro para seleção de superfícies e criação de padrão

Tendo em conta que os modelos a programar em PowerMILL no CEIIA raramente são desde logo gerados como sendo de extensão “.dgg”, é necessária conversão dos mesmos, o que leva por vezes a variações na orientação das superfícies. Na grande maioria das estratégias utilizadas na aplicação CAM a orientação da superfície não tem influência na qualidade do percurso; no entanto, acontece que o acabamento por padrão é uma das estratégias afetadas, sendo por isso estritamente necessário garantir que todas as superfícies a maquinar (ou seja, todas as superfícies do topo abrangidas pelo padrão) têm a orientação correta [19].

Em modelos com poucas superfícies a incluir no padrão, torna-se relativamente fácil para o utilizador detetar as que devem ser invertidas, invertê-las e selecionar manualmente as que deverão dar origem ao padrão. Por isso mesmo, na macro em questão, é inicialmente dada a possibilidade do utilizador fazer uma pausa na macro para efetuar essa seleção; caso o utilizador decida não seguir essa via, é feita uma seleção automática. Em ambos os casos, após seleção da(s) superfície(s), a macro cria um padrão que contém a geometria selecionada do modelo.

Quanto à seleção automática referida acima, é importante salientar que, para poder ser efetuada através de uma macro, teve de ser baseada em operações lógicas que pudessem excluir as superfícies indesejadas. Uma vez que as referências internas da linguagem de macros para PowerMILL não permitem guardar superfícies específicas, a forma mais intuitiva de as guardar passou por utilizar níveis e conjuntos para as reunir num só conjunto. De acordo com essa ideia, foi criada uma função auxiliar na macro, dedicada à seleção automática (é possível consultar um exemplo do efeito dos passos referidos por letras na figura 7), em que:

- É guardado o nome do conjunto que será criado para poder utilizar essa variável como referência na manipulação do mesmo;
- Uma vez que nos modelos para corte de placas apenas existem superfícies totalmente planas ou totalmente verticais, é utilizada a ferramenta de seleção de componentes por contra saída, sendo utilizado um ângulo de saída de 0° , para seleccionar as superfícies verticais, independentemente da sua orientação (**B**);
- Já com o intuito de começar a isolar superfícies, é invertida a seleção (ficando com todas as superfícies planas, correspondentes ao topo e base do modelo) e criado o conjunto ao qual são adicionados apenas os componentes seleccionados (**C**);
- De forma a orientar todas as superfícies do topo, é novamente utilizada a ferramenta de seleção de componentes por contra saída, sendo desta vez utilizado um ângulo de saída de -90° para seleccionar apenas as superfícies invertidas. Uma vez seleccionadas, é invertida a direcção das mesmas, sendo posteriormente escondidos todos os níveis e conjuntos exceto o que contém as superfícies planas que, nesta fase, se encontram todas orientadas na mesma direcção (**D**);
- A exclusão visual das restantes superfícies foi feita com o propósito de utilizar um método relativamente eficaz para retirar do conjunto as superfícies da base: utilizando a vista da base, é utilizada a opção de seleccionar os componentes invertidos visíveis, obtendo-se apenas a camada inferior (**E**). No entanto, após exclusão das superfícies seleccionadas nesta fase, foi verificado que nem sempre eram detetadas todas as superfícies da base, possivelmente devido ao limite de deteção de superfícies visíveis, que em alguns casos pode ser superior à dimensão dos componentes a seleccionar. Por esse mesmo motivo, foi incluída uma pausa na macro, em que é apresentada a vista frontal ao utilizador e é pedida uma confirmação de que todas as superfícies da base foram excluídas. Caso tal não se verifique, é ainda

pedido que o utilizador selecione manualmente as superfícies da base que, para estarem presentes, seguindo a lógica formulada para o problema de deteção, devem apresentar dimensões bastante reduzidas. Uma vez selecionadas, são excluídas do conjunto, restando à função da macro selecionar exclusivamente as superfícies do conjunto criado (F), antes de voltar à função principal para criar o padrão.

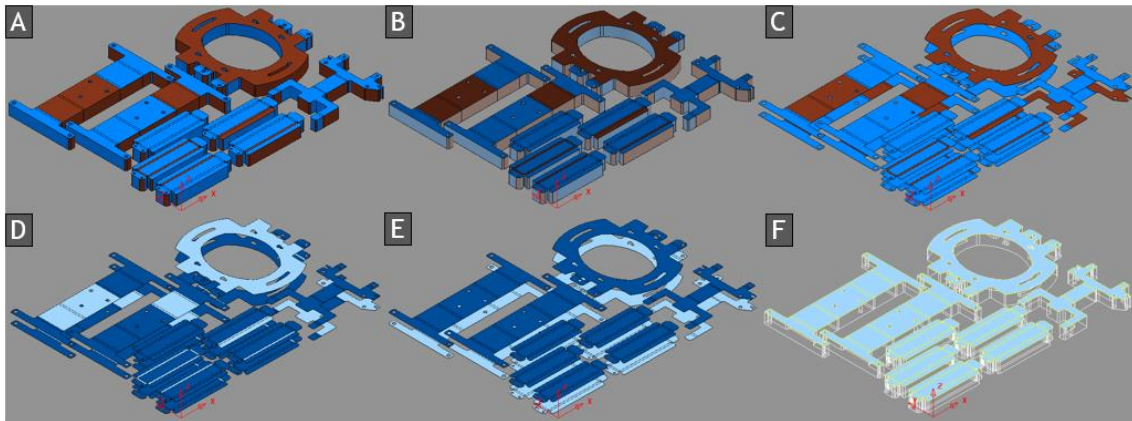


Figura 7 - Efeito da função dedicada a seleção automática incluída na macro, desde o aspeto do modelo inicial (A) até à seleção da superfície do topo, devidamente orientada (F) [23].

É importante referir que, para gerar o padrão, apenas podem ser utilizadas as superfícies do topo do modelo. Por isso mesmo, a parte da macro que visa excluir as superfícies da base torna-se necessária, mesmo que a sua eficácia não seja total. Por se destinar a um corte bidimensional, em que as superfícies do topo e da base do modelo são correspondentes, seria de esperar que pudesse ser criado um padrão com base em ambas as camadas do modelo, sendo o mesmo planificado e excluídos os itens duplicados. No entanto, ao criar um padrão, mesmo tendo as superfícies a mesma orientação, os segmentos da base e do topo adquirem por vezes direções diferentes, o que, após a planificação, vai impedir a aplicação CAM de os identificar como duplicados. Consequentemente, ao aplicar a estratégia de acabamento, vão surgir troços do percurso que efetuam duas vezes o mesmo corte, por serem detetados dois segmentos sobrepostos do padrão (que têm direções diferentes).

5.2.4. Macro para aplicar offset ao padrão ativo

Apesar de se tratar de uma macro útil para programação CAM em geral, no processo em questão torna-se bastante importante uma vez que os padrões são quase sempre gerados a partir da geometria exata do modelo, sendo necessário utilizar um *offset* que compense a marca deixada pelo jato de água ao cortar. Por ter sido redigida especificamente para este tipo de programação, é questionado ao utilizador se pretende utilizar um valor de 0,35 mm, por se obter normalmente uma boa

precisão geométrica utilizando este valor (em conjunto com os parâmetros de corte adequados). No entanto, tal como na macro para escalar ao longo do eixo das ordenadas, é possível definir outro valor para o *offset*.

5.2.5. Macro para desenhar a ferramenta de jato de água

Apesar de na prática não ser montada uma ferramenta, quando o fluxo é ativado, as placas a cortar são sempre posicionadas a uma distância de 1,5 mm da ponteira do robô. Como característica do processo, o fluxo adquire uma forma cônica, apresentando um diâmetro de 0,761 mm ao sair da ponteira. Por isso mesmo, deve ser considerada no projeto de PowerMILL uma ferramenta do tipo fresa de topo, com 1,5 mm de altura e 0,761 mm de diâmetro (ver figura 4-A em anexo), que pode ser rapidamente desenhada recorrendo à macro em questão.

5.2.6. Macro para criar estratégia de acabamento por padrão personalizada

Tendo um plano de trabalho e um padrão ativos, é criada uma estratégia de acabamento por padrão com os parâmetros normalmente utilizados para este processo: é definida a tolerância a utilizar, são calculadas as alturas de segurança, é definido o ponto inicial como correspondente ao primeiro ponto seguro e são adaptadas as definições de distribuição de pontos. Uma vez que, na maior parte dos casos, as restantes definições podem ser aplicadas por edição do percurso calculado, é questionado ao utilizador se pretende calcular desde já o percurso.

Quanto à distribuição de pontos, é de realçar que, enquanto que para um CM é recomendável minimizar o número de pontos, utilizando arcos para manter a tolerância em relação ao modelo, dando uma maior fluidez ao movimento; para o controlador do robô é mais indicado transmitir um maior número de pontos, que perfazem a geometria das curvas, devido à forma como a leitura dos mesmos é feita pelo equipamento. Assim, na definição de estratégias de maquinagem para ambos os robôs, é utilizada a redistribuição de pontos do percurso, em função da distância e/ou ângulo máximo permitidos entre pontos [24].

Após a decisão de cálculo, é ainda mostrada uma mensagem informativa ao utilizador, de forma a lembrar que é de qualquer forma necessário adaptar as definições de ordem de segmentos de percurso, entradas e saídas e avanços e velocidades, de forma adequada ao corte do modelo em questão. A definição destes parâmetros acaba por ser difícil de automatizar, por depender bastante do corte a efetuar, como poderá ser visto no projeto descrito em 5.8.

5.3. DESENVOLVIMENTO DE MACROS PARA A OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES REPETITIVAS DA PROGRAMAÇÃO CAM NO CEIIA

Apesar de serem constantemente utilizadas diferentes estratégias de programação no quotidiano do CEIIA, existem algumas operações repetitivas, que podem ser otimizadas através de macros. Com esse intuito, foram desenvolvidas macros ao longo do estágio para:

5.3.1. *Criar no projeto de PowerMILL ferramentas com a geometria aproximada à das que existem no CEIIA*

À semelhança do que foi feito para a ferramenta de corte por jato de água, foram adaptadas macros para criar ferramentas frequentemente utilizadas, já com haste, suporte e ressalto definidos. Outra forma de criar ferramentas comuns consiste em inserir numa base de dados as ferramentas e respetivos suportes; no entanto, no contexto do CEIIA, nem todos os programadores optam por essa alternativa, sendo por isso importante manter macros funcionais e atualizadas para a criação de ferramentas.

5.3.2. *Atribuir a todos os percursos presentes no projeto de PowerMILL a mesma velocidade de movimentos rápidos*

Uma vez que no controlador de cada um dos equipamentos disponíveis para maquinaria é possível adaptar a velocidade rasante (velocidade aplicada a movimentos rápidos, nos quais não é removido material), com algumas limitações, é frequentemente utilizada no projeto de PowerMILL a mesma velocidade para todos os percursos, sendo posteriormente adaptada. Para além disso, apesar de não existir um limite máximo na aplicação CAM, em alguns equipamentos, como no da marca Haas, apenas podem ser pós-processados programas com uma velocidade rasante máxima (neste caso de 9000 mm/min). Quando ultrapassado esse limite, surge uma mensagem de erro no controlador, sendo necessário pós-processar novamente o programa com uma velocidade rasante menor. Ao introduzir a velocidade rasante a partir da macro desenvolvida, é possível evitar falhas a esse nível, que possam surgir por esquecimento de verificar a velocidade de um ou mais percursos.

5.3.3. Posicionar o modelo da peça no local indicado em relação ao modelo da célula do robô

Ao utilizar a célula do robô no *plug-in* PowerMILL Robot, é sempre necessário posicioná-la em relação ao modelo da peça. Para tal, é criado um novo plano de trabalho, com coordenadas definidas em relação ao plano de trabalho inicial, para passar a corresponder à posição de origem da célula. Tendo em conta que, tanto no caso do robô para moldes como no do robô de corte por jato de água, a posição é obtida de forma semelhante, foi desenvolvida apenas uma macro para os dois robôs.

Na macro em questão, é inicialmente feita uma verificação do robô que foi carregado no projeto PowerMILL, sendo, em função do mesmo, utilizados valores diferentes para os eixos X e Z. Já para o valor do eixo Y, é calculado um ponto médio, tendo em conta os limites do bloco, destinando-se a centrar o modelo em relação à célula robótica. Nesta operação em particular acaba por ser bastante útil utilizar um automatismo porque, como a posição e altura da mesa de apoio e do tanque de água se mantêm constantes, são utilizados quase sempre os mesmos valores em X e Z.

5.3.4. Personalizar a velocidade utilizada num percurso

A nível do controlador do robô (cujo modelo é o mesmo para ambos os robôs do CEIIA), é possível definir o grau de aproximação posicional que o robô deve atingir em relação a um ponto programado. Em segmentos do percurso curvos, esta definição tem uma grande influência porque, se não for permitida qualquer variação em relação à posição programada, a trajetória é lida como uma série de movimentos retos, dando um acabamento superficial inadequado. Nesse sentido, tendo em conta as indicações presentes no manual do controlador (ver figura 8), é utilizado no CEIIA o valor de 1 para este parâmetro [24].

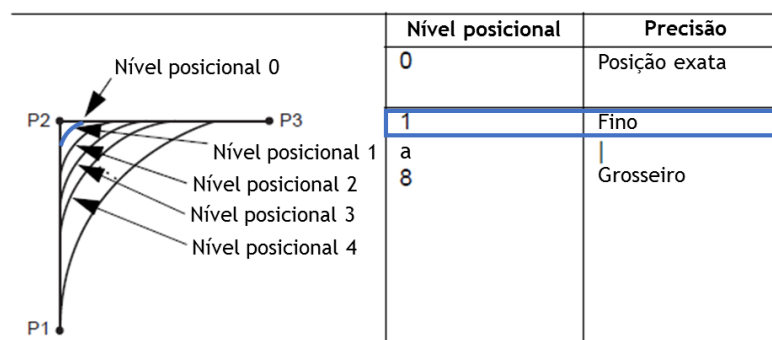


Figura 8 - Relação entre o nível posicional utilizado e a precisão do percurso, segundo o manual do controlador DX100. Em destaque, é apresentado o nível atualmente utilizado no CEIIA [24].

No entanto, com a experiência adquirida ao maquinar com o robô, observou-se a existência de zonas em que o acabamento apresenta menor qualidade, mesmo com esta definição e com a utilização de estratégias com redistribuição de pontos. Por essas zonas críticas estarem associadas a trajetórias curvas e, particularmente, a cantos internos na geometria, foi ponderada a hipótese de reduzir localmente a velocidade. Esta opção deveu-se ao facto de o controlador dos robôs não aplicar nenhuma compensação a nível de velocidade nas curvas, como ocorre nos centros de maquinaria presentes no CEIIA, e à suspeita de que o não cumprimento do nível posicional pudesse estar relacionado com isso, por ser referido no manual do controlador que, caso o nível posicional não esteja definido, a precisão dependerá da velocidade da operação [24].

A nível de corte por jato de água, por serem maioritariamente utilizadas estratégias bidimensionais, é possível fazer um ajuste manual da velocidade, através do controlador, mas que implica uma vigilância muito mais acrescida por parte do operador. No entanto, no caso do robô para moldes a situação torna-se mais complexa, sendo ainda mais justificável modificar a velocidade do percurso com recurso à aplicação CAM.

Tendo em conta que o *software* atualmente disponível no CEIIA não permite detetar todas essas zonas ou reduzir de forma automática a velocidade, foi considerada a possibilidade de utilizar a função de atualização de velocidade dentro de uma fronteira, disponível no PowerMILL. Para criar a fronteira em questão, torna-se então necessário criar um esboço personalizado ou identificar e seleccionar as superfícies críticas, para calcular uma fronteira de superfície seleccionada. De forma a facilitar o processo para o utilizador, foi redigida uma macro em que é decidido utilizar uma fronteira já existente ou, alternativamente, criar uma nova, após uma seleção manual de superfícies, para atualizar parte do percurso ativo para uma velocidade de avanço definida pelo utilizador.

Apesar do conjunto de operações incluído na macro não ser propriamente extenso, a sua utilização torna-se prática não só pela questão do tempo, mas também pelo esforço exigido ao operador. Por se tratar de uma definição adicional e que não é ainda frequentemente utilizada, existia alguma propensão a esquecer a aplicação desta correção ou a surgirem dificuldades em encontrar os comandos necessários. Os

efeitos da utilização desta correção são, no entanto, notórios mesmo a olho nu, tal como é possível ver na figura 9, em que estão representadas imagens de acabamentos de cantos internos em peças maquinadas no mesmo material, com e sem redução de velocidade local.

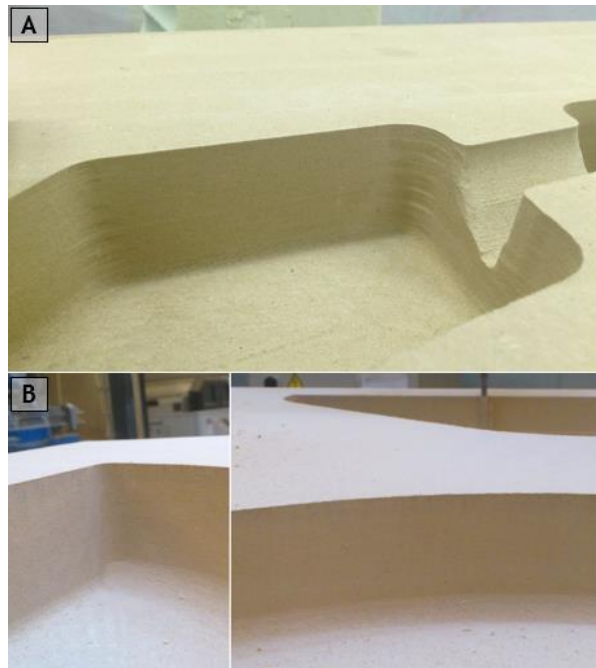


Figura 9 - Aspeto de cantos internos em duas peças maquinadas em MDF. Em A não foi utilizada redução local da velocidade, em B foi utilizada a macro em questão para aplicar uma velocidade de 65% nos cantos internos.

5.4. PROGRAMAÇÃO CAM DE MODELO, PARA MAQUINAGEM A 3 EIXOS, E ACOMPANHAMENTO DA MESMA NO EQUIPAMENTO DA MARCA AWEA

De forma a aplicar conhecimentos específicos de programação CAM com recurso a 3 eixos, foi estudado o modelo CAD presente na figura 10 (que viria a ser maquinado em poliuretano), por apresentar na sua geometria zonas que exigem ferramentas e estratégias de acabamento diferentes: cavidades, reentrâncias, superfícies inclinadas, cantos com arestas vivas, áreas planas e furos.

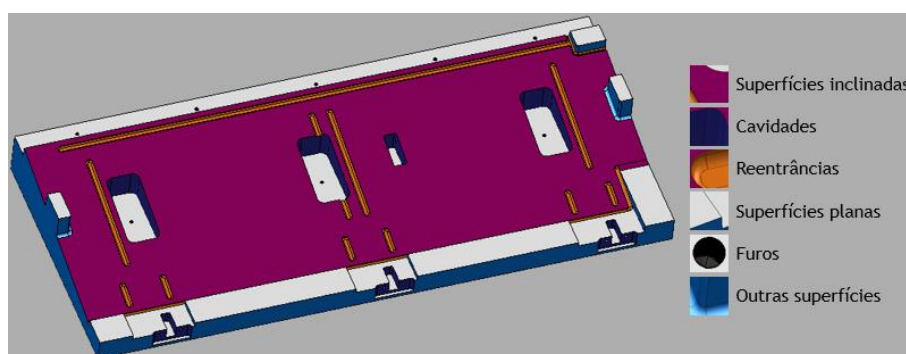


Figura 10 - Modelo CAD incluído num projeto do CEIIA, estando destacadas diferentes zonas [21].

Como já foi referido anteriormente, a atividade do CELIA foca-se em peças de pequena série, o que acaba por implicar quase sempre uma abordagem analítica a cada peça. Neste primeiro projeto de programação, foi possível seguir todo o processo de análise de operações a efetuar, definição da ordem de superfícies a maquinar e seleção das ferramentas a utilizar, tendo em conta a geometria do modelo e o equipamento e material em que a peça seria maquinada [5].

Pelo motivo mencionado e por normalmente haver acesso prévio ao bloco de material a maquinar, é feita a análise do modelo CAD, não só tendo em conta características que condicionam a programação, como o raio mínimo de ferramenta a utilizar e geometrias com detalhes peculiares; mas também características práticas da operação, como a fixação e possíveis mudanças de amarração ao longo de todo o processo. Nesse sentido, as primeiras estratégias de desbaste programadas estão normalmente relacionadas com a redução das dimensões do bloco para as cotas pretendidas ou para cotas iniciais que facilitem uma posterior amarração do mesmo.

De acordo com essa metodologia, após a definição da amarração a utilizar e das dimensões do bloco inicial, foi definido um plano de trabalho correspondente ao centro (no plano XY) e topo do bloco, orientado de forma a que a superfície inclinada fique de frente para o operador da máquina, facilitando a vigilância das operações a efetuar. Utilizando esse plano de trabalho, foi então calculada uma estratégia para maquinar o contorno do bloco (A). Por se pretender produzir as cotas finais das zonas maquinadas (e portanto um bom acabamento superficial) e evitar que fosse deixado um raio no fundo da peça, foi escolhido um valor de passo vertical reduzido mas que fosse ainda assim superior ao valor do raio da ponta da ferramenta utilizada. Para garantir esse efeito, foi também ligeiramente reduzido o valor mínimo de Z do bloco. Alguns parâmetros pertinentes desta e das restantes estratégias (A a I), programadas em PowerMILL, estão disponíveis para consulta na tabela 1.

Tendo em conta a geometria específica do modelo CAD, foi posteriormente calculada uma estratégia de *desbaste do modelo* (B) com uma ferramenta de maior dimensão, de maneira a remover uma grande quantidade de material em relativamente pouco tempo. Por o material a maquinar se tratar de um compósito de “fácil maquinagem” e considerando as recomendações da marca da fresa, foi possível utilizar um passo lateral e um passo vertical da ordem dos 60% e 4% do

diâmetro da fresa, respetivamente. É ainda importante destacar que, apesar de se obterem resultados com melhor acabamento superficial utilizando um estilo 3D *offset* em áreas planas, nesta estratégia é frequente optar por um estilo do tipo cópia, principalmente em operações iniciais ou intermédias, por implicar que a máquina mova um menor número de eixos em simultâneo. Outro aspeto tido em conta nas operações de desbaste é a forma como a ferramenta entra no material; por serem utilizados passos verticais que podem fazer com que seja removido bastante material em cada passagem, é recomendável utilizar uma entrada que minimize o impacto para a ferramenta, em relação a uma situação em que a mesma começaria o percurso mergulhando diretamente no bloco. Neste caso, foi utilizada uma entrada em rampa, de forma a começar o movimento fora do bloco, entrando no mesmo numa posição lateral [5,25].

Uma vez que a ferramenta utilizada no desbaste inicial tinha um diâmetro demasiado grande para desbastar algumas cavidades do modelo, houve necessidade de programar ainda uma operação de re-desbaste (C), de forma a deixar uma menor quantidade de material para as ferramentas de acabamento. Utilizando o desbaste inicial como referência para uma ferramenta menor, foi possível aceder a zonas do modelo não abrangidas pela estratégia anterior. Puderam ainda nesta fase ser utilizados valores de passo lateral e vertical de maior grandeza (em relação ao diâmetro da ferramenta), por ser necessário remover uma quantidade substancialmente menor de material. A ferramenta utilizada nesta estratégia foi escolhida tendo por base, não só a disponibilidade de fresas de desbaste, mas também a análise dos raios mínimos do modelo em PowerMILL, através da qual é possível sombrear as áreas do modelo a que uma ferramenta, com raio definido pelo utilizador, não tem acesso.

Após a remoção da maior parte do material em excesso no bloco, através da análise da geometria do modelo e da utilização da ferramenta de medição incluída na aplicação CAM, procedeu-se à definição de estratégias de acabamento. Para as zonas verticais e bastante inclinadas, destacadas na figura 11, optou-se pela definição de estratégias do tipo *acabamento Z constante* (D). Para as mesmas foram utilizadas diferentes fresas de topo, cujo diâmetro foi escolhido de acordo com a disponibilidade de ferramentas e com os limites da zona a maquinar. A título de exemplo, ao utilizar a ferramenta de medição na menor cavidade (ver figura 5-A em

anexo), entre as que estão incluídas na superfície inclinada, é obtida uma largura máxima de 20,1 mm, o que significa que, para entrar na cavidade, o diâmetro da ferramenta tem de ser inferior a esse valor. No entanto, uma vez que a geometria apresenta um diâmetro de 6 mm nos cantos, a última ferramenta a utilizar terá de ter no máximo esse diâmetro para garantir que não é deixado material em excesso.

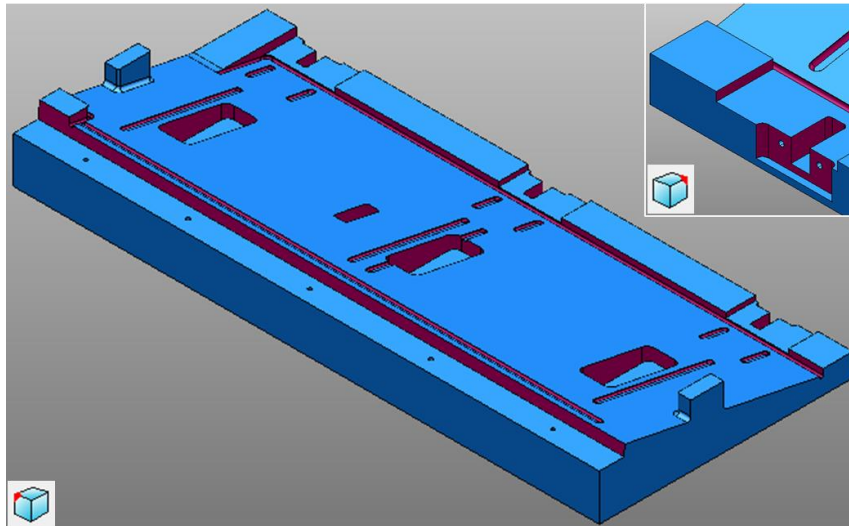


Figura 11 - Destaque das zonas inclinadas presentes no modelo (segundo vistas isométricas em relação ao plano de trabalho definido), a que foram aplicadas estratégias de acabamento com *Z* constante [21].

Sobre esta estratégia é ainda de salientar que tiveram de ser utilizadas sobre espessuras laterais diferentes de acordo com a finalidade da superfície em questão. Enquanto que, para a zona inclinada que apenas é vista de trás e para as cavidades com saída para a frente, foi possível calcular uma sobre espessura lateral de zero, para as reentrâncias teve de ser deixada uma sobre espessura positiva, por serem sujeitas a um segundo acabamento. No caso das cavidades centrais, para além de ser deixada uma sobre espessura positiva, foram ainda programadas estratégias com sobre espessuras decrescentes (utilizando a macro desenvolvida no projeto descrito em 5.1), de forma a maquinar gradualmente essas zonas que, no âmbito do projeto, se tratavam de zonas de encaixe com outras peças.

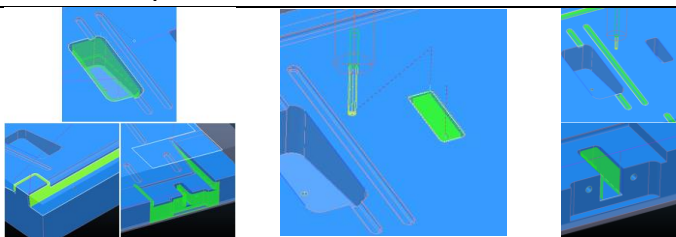
Adicionalmente, foram calculadas estratégias do tipo *acabamento Z constante* para fazer uma primeira maquinagem dos furos (E), cujas dimensões seriam obtidas no final por roscagem e mandrilagem manual. A opção por operações manuais foi, mais uma vez, possível por se tratar de um material de “fácil maquinagem”, não sendo também necessário incluir um maior número de ferramentas na árvore do CM.

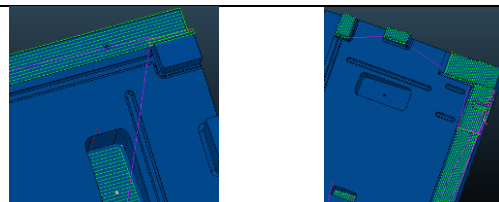
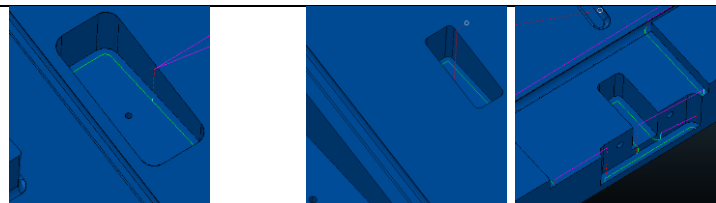
Para o interior das reentrâncias (F) e para a superfície com alguma inclinação que contém as cavidades e reentrâncias (G), foram ainda calculadas estratégias do tipo *acabamento inclinado e raso*, neste caso com o estilo *offset* 3D nas áreas com inclinação inferior a 30°, por se tratar de um acabamento final. Na estratégia para a superfície inclinada, foram ainda incluídas as superfícies verticais que rodeiam os dois paralelepípedos isolados dos lados. Apesar das áreas abrangidas por ambos os cálculos poderem ser maquinadas recorrendo à combinação de outros tipos de estratégias, ao utilizar o acabamento inclinado e raso, é garantida a maquinagem de toda a área utilizando apenas um percurso. Esta situação pode ser vantajosa em termos de redução da vigilância necessária, por não haver mudanças de percurso e serem geradas transições suaves entre zonas planas e ingremes sempre que possível. Por exemplo, no limite das reentrâncias e na ligação entre a superfície inclinada com os paralelepípedos, é possível obter, através desta estratégia, percursos como os representados na figura 6-A em anexo. É ainda de realçar que, por ter sido necessário utilizar uma ferramenta esférica para este acabamento, os valores de passo lateral e passo vertical utilizados tiveram de ser bastante reduzidos (na ordem de 4% do diâmetro da ferramenta na estratégia G), para conseguir deixar uma crista reduzida no acabamento.

Por existirem ainda superfícies planas (destacadas a uma cor clara na figura 10), foram calculadas estratégias do tipo *acabamento raster plano* (H), por corresponderem à projeção de um padrão num plano específico. Aplicada a uma superfície em que não há variação de altura, por existir correspondência de todos os pontos com um único plano de projeção, torna-se possível utilizar passos laterais elevados (neste caso ultrapassando 60% do diâmetro da fresa), sem que isso comprometa a qualidade superficial. A utilização de uma grande área do diâmetro da ferramenta aliada ao facto de não ser removida uma grande quantidade de material potencia ainda uma diminuição do tempo gasto neste tipo de operação.

Por fim, uma vez que existiam no modelo arestas que teriam obrigatoriamente de fazer ângulos de 90° por questões de encaixe com outras peças, foram utilizadas fresas de topo para programar uma única passagem em cada uma dessas arestas (I). Para conseguir esse efeito, foi utilizada a estratégia de *acabamento de cantos pencil*, que resulta em linhas de percurso que correspondem a um *offset* da forma da aresta, com uma compensação do raio da ferramenta.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados nas estratégias programadas para o modelo CAD.

Estratégia A	
Tipo de estratégia	Acabamento Z constante (em espiral)
Tipo de ferramenta	Tórica
Dimensões da ferramenta	D = 20,0 mm; RP = 0,8 mm
Passo vertical mínimo	1,0 mm
Sobre espessura	0,0 mm
Entrada	Em rampa: AD = 1°; altura = 2 mm
Estratégia B	
Tipo de estratégia	Desbaste do modelo (estilo <i>raster</i>)
Tipo de ferramenta	Tórica
Dimensões da ferramenta	D = 40,0 mm; RP = 2,0 mm
Passo vertical	1,5 mm
Passo lateral	25,0 mm
Sobre espessura	0,2 mm
Entrada	Em rampa: AD = 1°; altura = 2 mm
Estratégia C	
Tipo de estratégia	Desbaste de resíduo do modelo (estilo <i>raster</i>)
Tipo de ferramenta	Tórica
Dimensões da ferramenta	D = 16,0 mm; RP = 0,8 mm
Passo vertical	1,0 mm
Passo lateral	12,0 mm
Sobre espessura	0,2 mm
Entrada	Em rampa: AD = 1°; altura = 2 mm
Estratégias D	
Tipo de estratégia	Acabamento Z constante
Tipo de ferramenta	Fresa de topo
Zona de aplicação	
Dimensões das ferramentas	D = 10,0 mm; D = 6,0 mm; D = 4,0 mm
Sobre espessura	Variável
Estratégia E	
Tipo de estratégia	Acabamento Z constante
Tipo de ferramenta	Fresa de topo
Dimensões da ferramenta	D = 4,0 mm
Passo vertical	0,2 mm
Sobre espessura	Variável
Estratégia F	
Tipo de estratégia	Acabamento inclinado e raso (estilo <i>offset 3D</i>)

Tipo de ferramenta	Esférica		
Dimensões da ferramenta	D = 4,0 mm		
Passo vertical	0,2 mm		
Passo lateral	0,2 mm		
Sobre espessura	0,0 mm		
Estratégia G			
Tipo de estratégia	Acabamento inclinado e raso (estilo <i>offset</i> 3D)		
Tipo de ferramenta	Esférica		
Dimensões da ferramenta	D = 10,0 mm		
Passo vertical	0,4 mm		
Passo lateral	0,4 mm		
Sobre espessura	0,0 mm		
Estratégias H			
Tipo de estratégia	Acabamento <i>raster</i> plano		
Tipo de ferramenta	Fresa de topo		
Zona de aplicação			
Dimensões da ferramenta	D = 10,0 mm;	D = 6,0 mm	
Passo lateral	4,0 mm		
Sobre espessura	0,0 mm		
Estratégias I			
Tipo de estratégia	Acabamento de cantos <i>pencil</i>		
Tipo de ferramenta	Fresa de topo		
Zona de aplicação			
Dimensões da ferramenta	D = 10,0 mm;	D = 6,0 mm	
Sobre espessura	0,0 mm		
Em que: D - diâmetro da ferramenta RP - raio da ponta da ferramenta AD - ângulo de descida no bloco			

Após o pós-processamento dos programas NC e maquinagem do bloco de acordo com as estratégias referidas, foram ainda ajustadas as dimensões dos furos, sendo dado também um pequeno chanfro na superfície de cada um. Na figura 12 pode ser vista uma imagem real da zona central da peça, após maquinagem.



Figura 12 - Aspeto final da zona central da peça maquinada, que inclui áreas sujeitas a diferentes estratégias de acabamento.

5.5. PROGRAMAÇÃO CAM DE MODELO, PARA MAQUINAGEM A 3+2 EIXOS, E ACOMPANHAMENTO DA MESMA NO EQUIPAMENTO DA MARCA HAAS

No âmbito de um projeto do CEIIA, através da análise da geometria de alguns dos modelos, foi possível verificar que, entre outros detalhes, os mesmos apresentavam furos numa orientação perpendicular àquela em que é favorável proceder ao desbaste, sendo por isso definido que as peças seriam maquinadas a 3+2 eixos, de forma a facilitar não só a questão da programação CAM, mas também as questões de suporte do bloco. Com esse intuito, foi montado no centro de maquinagem vertical da marca Haas o prato divisor, que permite a utilização dos eixos de rotação A e B.

De forma a aplicar conhecimentos e desenvolver aptidão na programação CAM com 3+2 eixos, foi estudado um dos modelos CAD em questão (ver figura 13), sendo posteriormente acompanhada uma parte da sua maquinagem em liga de alumínio 7075 T651.

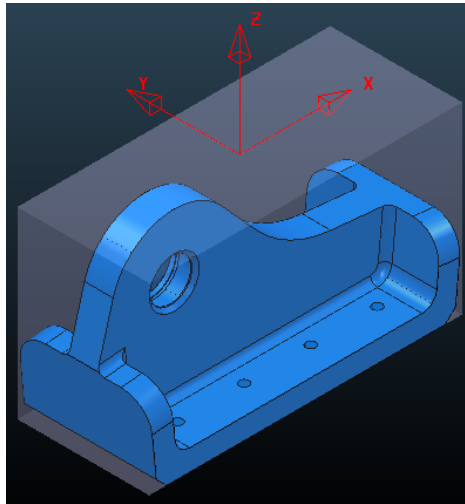


Figura 13 - Modelo CAD abordado, na posição inicial do bloco a maquinar, estando também representado o plano de trabalho ativo nesse momento [23].

À semelhança do que é feito quando se recorre apenas a 3 eixos, utilizando um plano de trabalho no centro e topo, e considerando um aperto abaixo do bloco (representado na figura anterior, a sombreado), começou por ser programada uma redução do bloco até próximo dos limites do modelo. De facto, na etapa de desbaste, foram programadas estratégias semelhantes às da peça referida em 5.4, sendo seguida a metodologia de programação típica para remover a maior parte do material em excesso: fazer um contorno do bloco (A), proceder ao desbaste de grande parte do material (B) e finalmente a um re-desbaste com uma fresa de menor diâmetro (C), de forma a minimizar a quantidade de material a remover na etapa de acabamento. Alguns dos parâmetros utilizados nestas e nas restantes estratégias abordadas (A a G) estão disponíveis para consulta na tabela 2.

Após as operações de desbaste, tendo em conta a decisão de maquinar com 3+2 eixos, poder-se-ia ter optado por um acabamento segundo cada plano de trabalho perpendicular ao inicial, minimizando assim o comprimento máximo de ferramenta necessário. No entanto, por ser possível efetuar a operação de acabamento, em toda a extensão da peça, recorrendo ao plano de trabalho inicial como referência e com a ferramenta próxima do seu comprimento limite, desde que fossem utilizadas menores velocidades de corte, foi seguida essa mesma opção. Uma vez que existiam zonas com inclinação variável (como o topo do modelo) e havia interesse em programar apenas uma estratégia para minimizar as transições necessárias, foi programada uma estratégia do tipo *acabamento inclinado e raso* (D). Para evitar a remoção de demasiado material de cada vez, foi ainda criada uma cópia da

estratégia com sobre espessura positiva, que seria maquinada previamente, servindo como semi-acabamento. Após a junção de ambas as estratégias num programa NC, por se tratar de uma operação relativamente demorada, por não utilizar os eixos de rotação e por a análise do ficheiro pós-processado não levantar questões acerca dos movimentos, foi ainda decidido maquinar durante a noite, sem supervisão.

Em concordância com a decisão de maquinar o furo principal recorrendo à movimentação de eixos de rotação, foi criado o plano de trabalho presente na figura 14, cujo eixo Z tem a mesma direção que o centro do furo, de forma a que, na prática, o eixo de rotação A apenas tenha de rodar 90°.

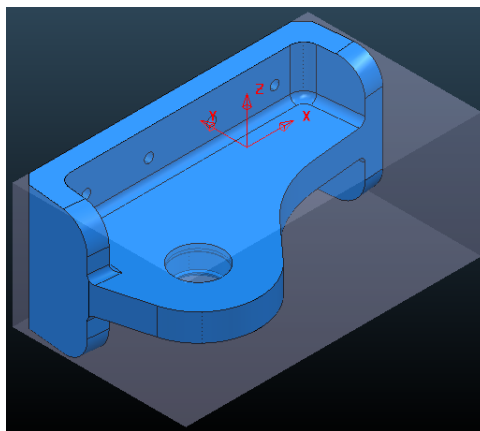


Figura 14 - Modelo CAD abordado, na segunda posição a assumir, estando também representado o plano de trabalho ativo nesse momento [23].

Uma vez que o menor diâmetro do furo era de 18,5 mm (na parte inferior) e a ferramenta disponível para o maquinar tinha 6 mm de diâmetro, foi necessário programar a mesma estratégia (E) com sobre espessuras decrescentes, para garantir que a ferramenta tinha acesso a todo o material de forma gradual. Por se tratar de uma área inclinada, foram calculadas estratégias do tipo *acabamento Z constante*, em espiral, de forma a deixar uma sobre espessura inicial de 5 mm, que viria a ser reduzida até atingir as cotas pretendidas.

Aquando da análise da geometria do furo, foram ainda detetados um rasgo com diâmetro superior ao da entrada do furo (22,6 mm em comparação com 22 mm no topo), e um chanfro na base, que não são abrangidos pela estratégia anterior. Por justificarem particular atenção na maquinagem, para garantir o cumprimento de cotas e tolerâncias, essas zonas foram alvo de estratégias independentes, tendo a programação do chanfro justificado mesmo a definição de um terceiro plano de trabalho.

De forma a maquinar o rasgo, foi escolhida uma estratégia do tipo *acabamento por projeção de linha (F)*, uma vez que a projeção não tem em conta a parte superior do modelo, sendo o percurso limitado em altura de forma a cumprir as tolerâncias impostas pelo desenho técnico. É de realçar que, por a zona a aceder ter um diâmetro superior ao da entrada do furo, teve de ser utilizada uma ferramenta de disco. Nesta fase da programação, a edição retrospectiva de percursos tornou a limitação do movimento da ferramenta bastante mais acessível, permitindo suprimir movimentos que não resultariam em remoção de material e copiar troços do percurso de forma a cumprir, de acordo com a simulação, a cota superior. Na figura 15 é possível visualizar a posição da ferramenta ao simular um dos pontos do troço de percurso que permite obter a cota superior.

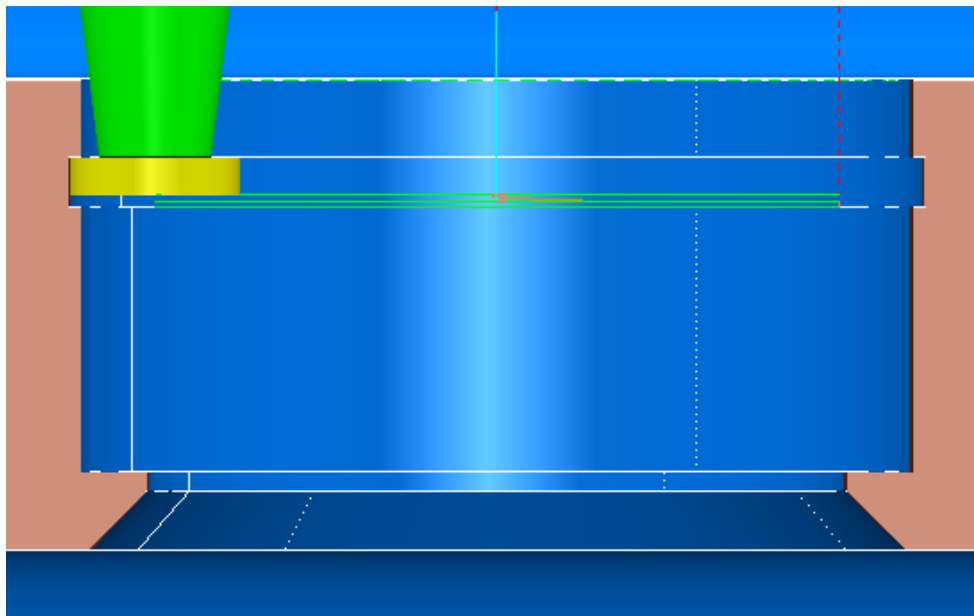


Figura 15 - Pormenor do furo presente no modelo CAD, em relação à posição da ferramenta de disco ao seguir a estratégia de acabamento por projeção de linha. Imagem obtida através de selecionamento dinâmico em PowerMILL [23].

Quanto à programação para o chanfro na base, foi definido um plano de trabalho oposto ao anterior, que implicaria uma rotação em torno do eixo B de 180°. Limitando a área desejada e utilizando uma ferramenta tórica, foi definida para essa zona uma estratégia do tipo *acabamento Z constante (G)*, com um passo vertical reduzido, para evitar que o passo lateral se tornasse muito elevado, uma vez que a inclinação da superfície era de apenas 45° (ver figura 7-A em anexo). Tendo em consideração que o acabamento segundo o primeiro plano de trabalho atingia apenas a superfície vertical (onde está contido o topo do chanfro) e o acabamento segundo o segundo plano de trabalho apenas maquinava o diâmetro inferior (18,5 mm), existia ainda

algum material em excesso, o que justificou a cópia da estratégia, utilizando uma sobre espessura inicial um pouco maior, para proceder a um semi-acabamento.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados nas estratégias programadas para o modelo CAD.

Estratégia A	
<i>Tipo de estratégia</i>	Acabamento Z constante (em espiral)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Tórica
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 40,0 mm; RP = 2,0 mm
<i>Passo vertical mínimo</i>	1,0 mm
<i>Sobre espessura</i>	0,1 mm
Estratégia B	
<i>Tipo de estratégia</i>	Desbaste do modelo (estilo <i>raster</i>)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Tórica
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 40,0 mm; RP = 2,0 mm
<i>Passo vertical</i>	1,0 mm
<i>Passo lateral</i>	28,0 mm
<i>Sobre espessura</i>	0,3 mm
Estratégia C	
<i>Tipo de estratégia</i>	Desbaste de resíduo do modelo (estilo <i>raster</i>)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Tórica
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 16,0 mm; RP = 0,8 mm
<i>Passo vertical</i>	0,35 mm
<i>Passo lateral</i>	12,0 mm
<i>Sobre espessura</i>	0,3 mm
Estratégias D	
<i>Tipo de estratégia</i>	Acabamento inclinado e raso (estilo <i>raster</i>)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Esférica
<i>Dimensões das ferramentas</i>	D = 6,0 mm
<i>Passo vertical</i>	0,2 mm
<i>Passo lateral</i>	0,2 mm
<i>Sobre espessura</i>	0,1 mm; 0,0 mm
Estratégias E	
<i>Tipo de estratégia</i>	Acabamento Z constante (em espiral)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Tórica
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 6,0 mm; RP = 0,2 mm
<i>Passo vertical mínimo</i>	0,2 mm
<i>Sobre espessura</i>	Variável
Estratégia F	
<i>Tipo de estratégia</i>	Acabamento por projeção de linha (estilo circular)
<i>Tipo de ferramenta</i>	Disco
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 4,5 mm; H = 1,0 mm
<i>Passo lateral</i>	0,15 mm

<i>Sobre espessura</i>	0,0 mm
Estratégia G	
<i>Tipo de estratégia</i>	Acabamento Z constante
<i>Tipo de ferramenta</i>	Tórica
<i>Dimensões da ferramenta</i>	D = 6,0 mm; RP = 0,2 mm
<i>Passo vertical mínimo</i>	0,1 mm
<i>Sobre espessura</i>	0,1 mm; 0,0 mm
Em que: D - diâmetro da ferramenta RP - raio da ponta da ferramenta H - altura	

Ao passar à fase de maquinagem da peça, após o desbaste e acabamento segundo o plano de trabalho inicial, e depois do pós-processamento dos programas NC que exigiriam movimentos dos eixos A e B, foram detetadas algumas divergências nas rotações, em relação ao que era esperado. Por esse mesmo motivo, optou-se por uma abordagem segura. Assim, e também por se tratarem de rotações simples, os movimentos ao longo dos eixos A e B foram definidos através do controlador da máquina, sendo os programas NC pós-processados sem essas transições, exigindo apenas a utilização de 3 eixos. No entanto, é importante realçar que essa situação implica, a nível de controlo do equipamento CNC, uma nova definição do zero da peça e a utilização de um programa NC para cada posição, o que aumenta consideravelmente o tempo gasto na preparação da maquinagem e se tornaria impraticável, por exemplo, numa situação de produção em série. A questão da inconformidade de rotações em relação ao programado e outras definições indesejadas, que surgiam ao utilizar o sistema de 3+2 eixos, levaram a um interesse no melhoramento do pós-processador especificamente utilizado para o equipamento, que será posteriormente abordado.

Posteriormente, foram maquinadas as duas superfícies laterais inclinadas, utilizando o mesmo método de posicionamento para as rotações necessárias. Tendo em consideração que seria necessária uma nova amarração para maquinar a base da peça, foi decidido maquinar os furos apenas depois da segunda fixação do bloco. O resultado final da maquinagem antes dessa mudança pode ser visto na figura 16.



Figura 16 - Aspeto da peça parcialmente maquinada, com destaque para a geometria peculiar do furo.

5.6. MELHORAMENTO DE PÓS-PROCESSADOR PARA HAAS VF11/40

5.6.1. Contexto inicial

Tal como foi indicado anteriormente, o ficheiro de configuração para pós-processamento utilizado no CEIIA (que se tratava de um ficheiro genérico para a série VF da Haas) apresentava algumas limitações/opções indesejadas. Nomeadamente:

- No início de cada percurso e após a troca de ferramentas, a refrigeração com água era ligada antes da ferramenta descer até à altura Z de segurança, como é possível ver na figura 8-A em anexo;
- Durante a troca de ferramentas, a velocidade era definida por defeito como 9000 mm/min. No entanto, o ficheiro pós-processado apenas definia a velocidade que deveria ser aplicada à nova ferramenta quando a mesma era diferente da velocidade da ferramenta anterior. Ou seja, quando eram utilizadas consecutivamente duas ferramentas diferentes mas com a mesma velocidade, era necessário modificar o ficheiro pós-processado manualmente, para impedir que fosse utilizada no segundo percurso a velocidade máxima (que corresponde à velocidade definida na troca de ferramenta). Como é compreensível, se tal acontecesse, dependendo do material a maquinar, as consequências poderiam ir desde um mau acabamento à danificação do próprio equipamento;
- Também durante a troca de ferramentas, bem como no final do programa NC, a mesa era movida para os pontos $X = 0$ e $Y = 0$ da máquina (ver figura 9-A em anexo): enquanto que a posição $Y = 0$ era útil para evitar colisões e para permitir ao operador

uma melhor visualização da peça, a posição $X = 0$ implicava geralmente um movimento longo e demorado (dada a amplitude de movimentos ao longo do eixo X de 3048 mm), sendo por isso geralmente modificado o ficheiro pós-processado para evitar esse movimento;

- Ao utilizar o prato divisor surgiam pontualmente dúvidas nas rotações (ao longo dos eixos A e B) geradas no ficheiro pós-processado, tal como ocorreu no projeto descrito em 5.5. Por isso mesmo, havia interesse em explorar esta questão e verificar se estaria relacionada com as definições do pós-processador;
- Adicionalmente, o tipo de ficheiro de configuração utilizado (.opt) correspondia a uma extensão que tem vindo a ser substituída por uma mais recomendada pela empresa que desenvolve a aplicação CAM. Nesse sentido, existia interesse em desenvolver um ficheiro de configuração personalizado para o CEIIA, na extensão mais recente (.pmoptz), de forma a facilitar posteriores edições do mesmo, através da aplicação Delcam Post Processor.

5.6.2. *Abordagem ao problema*

O desenvolvimento de pós-processadores pode tornar-se bastante complexo, sendo, por essa mesma razão, normalmente levado a cabo por empresas que comercializam o *software*. Na prática, ao vender a aplicação ou facultar suporte técnico, é habitual fornecer ao cliente um ficheiro de configuração genérico para o equipamento, que pode ser desenvolvido apenas tendo em conta o modelo a que se destina. No entanto, quando o objetivo passa por desenvolver um ficheiro de configuração adaptado a um equipamento, no contexto particular de uma empresa, torna-se necessário comunicar com a empresa em questão e eventualmente testar diferentes versões até obter o ficheiro final.

Com a finalidade de poder comunicar de forma mais eficaz com a Norcam, que comercializa a nível nacional este tipo de aplicações, poder proceder ao levantamento de alterações necessárias, compreender as modificações entre versões e implementar algumas dessas modificações, foram estudados alguns conceitos pertinentes no pós-processamento e desenvolvimento de ficheiros de configuração, especificamente aplicáveis ao centro de maquinagem da Haas, disponível no CEIIA.

Apesar de existir a possibilidade de converter um ficheiro de extensão “.opt” em “.pmoptz” através do Delcam Post Processor, essa opção não foi seguida, por não

ser tão aconselhada como construir um ficheiro “.pmoptz” de raiz. Tal prende-se do facto de que, na conversão, as configurações do ficheiro “.opt” são guardadas sob a forma de *scripts* (definições presentes no ficheiro original, escritas numa linguagem de programação que pode ser lida pelo Delcam Post Processor), o que pode ser uma solução rápida para não ter de utilizar o DuctPost, mas mantém ou agrava as dificuldades de edição associadas ao formato “.opt” [10].

No que toca à utilização de apenas 3 eixos de movimento, através da consulta dos parâmetros necessários, disponíveis nos manuais internos do equipamento, o desenvolvimento de um ficheiro de configuração pode ser relativamente simples para um programador experiente. Por isso mesmo, a grande maioria dos problemas que surgiam com o ficheiro “.opt”, que não dependiam da utilização dos eixos A e B, foi resolvida numa das primeiras versões do ficheiro “.pmoptz”. A partir dessa fase, a prioridade passou por melhorar o pós-processamento com o 4º e 5º eixo, que envolve conceitos mais complexos.

5.6.2.1. Cinemática e controlo posicional

Em termos de cinemática, é necessário definir no pós-processador que o equipamento se trata de um modelo com cinco eixos, em que ambos os eixos de rotação são montados na mesa, sendo também necessário indicar a direção e os limites de movimento de cada um dos cinco eixos. Esses limites são normalmente indicados pelo fabricante, sendo pontualmente ajustados para conveniência do operador; por exemplo, no ficheiro de configuração desenvolvido, o valor mínimo do eixo A foi alterado para forçar a solução em que a peça fica virada para o operador. Já a definição da direção, tem de ser ajustada tendo em conta o movimento da máquina, o que justificou o teste de movimentos e a alteração, através do Delcam Post Processor, dos ficheiros de configuração utilizados para os gerar, até chegar ao resultado adequado.

Quando é contemplada a questão do controlo de coordenadas em movimentos que envolvem os eixos de rotação, é importante referir que o equipamento disponível no CEIIA não tem compensação da ponta da ferramenta, o que significa que o ficheiro de configuração utilizado pelo pós-processador tem também de ter definido que se trata de um equipamento “multi-eixo, sem RTCP” (na figura 10-A em anexo é possível consultar as definições mencionadas) [10].

Num prato divisor, a rotação dá-se em torno de um ponto definido, conhecido como “ponto pivô”, que corresponde à intersecção dos eixos de rotação A e B. Tendo em conta que o ficheiro CLData a ser transcrito pelo pós-processador se refere à posição da ferramenta, é necessário conhecer a forma como variam as coordenadas da mesma na rotação, de forma a gerar as coordenadas que o controlador da máquina deve ler no programa NC. Nos equipamentos com RTCP, é feita uma compensação ao nível do controlador, de forma a que a rotação funcione como se o centro da ponta da ferramenta se tratasse do ponto pivô, o que faz com que o programa NC transmitido ao controlador não dependa da cinemática do 4º e 5º eixo [14].

Opostamente, quando o equipamento não tem essa compensação, torna-se necessário incluir compensações ao nível do programa NC. Para tal, é fundamental determinar as coordenadas exatas do ponto pivô para ajustar o zero da peça no controlador (uma função que cabe ao operador da máquina) e para o indicar, ao nível da aplicação CAM, como plano de trabalho de saída, de forma a que as coordenadas incluídas no ficheiro CLData estejam em função desse mesmo ponto. Adicionalmente, o ficheiro de configuração utilizado pelo pós-processador tem de estar adaptado para traduzir essas coordenadas para o programa NC, tendo por isso de incluir dados correspondentes à cinemática do equipamento. A figura 17 visa ilustrar o efeito na variação da posição da ponta da ferramenta com e sem compensação [10].

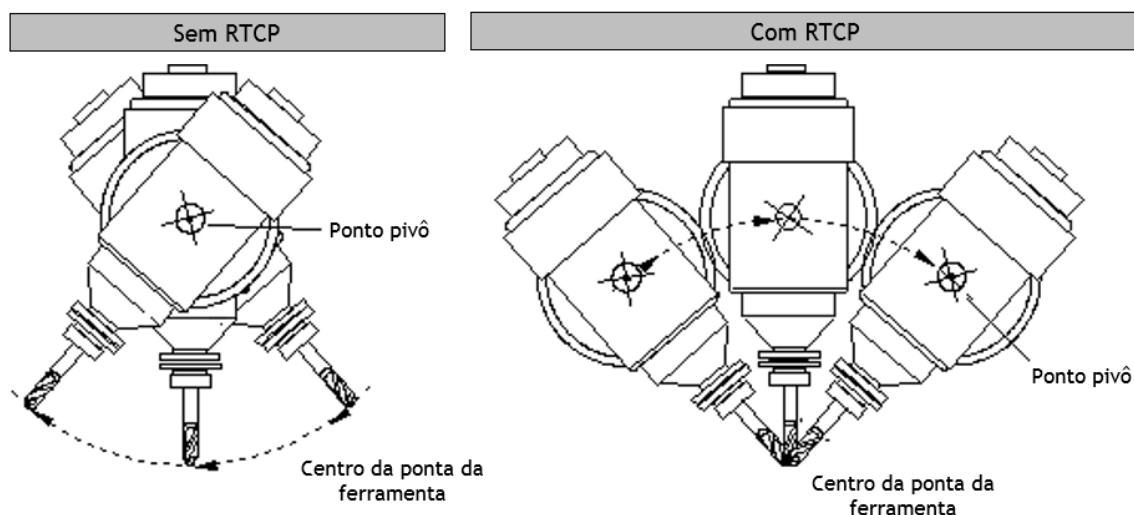


Figura 17 - Comparação entre o que ocorre no realinhamento do eixo da ferramenta (segundo o mesmo ângulo) com e sem compensação da ponta da ferramenta [26].

Como é possível aferir pelo que foi mencionado anteriormente, num equipamento sem RTCP, a determinação do ponto pivô é crucial para a obtenção de bons resultados, por todas as coordenadas estarem diretamente relacionadas com esse ponto. Ao longo deste projeto, para além de serem ajustadas as definições de cinemática do ficheiro de configuração, foram adquiridos alguns conhecimentos básicos sobre o procedimento de determinação do ponto pivô para um prato divisor (ver tabela 2-A em anexo), de forma a esclarecer as dúvidas que surgiam nas rotações e averiguar se ocorriam também problemas a esse nível. Após o teste de diferentes ficheiros de configuração e diferentes definições do ponto pivô, acabou por se conseguir conjugar a definição correta da cinemática no ficheiro de configuração com a determinação do valor real do ponto pivô, podendo obter peças conformes, maquinadas com recurso a 3+2 eixos, sem ser necessária qualquer edição manual dos programas pós-processados.

5.6.2.2. Condicionamento de comandos no ficheiro de configuração

A nível de desenvolvimento do ficheiro de configuração, outra questão pertinente passa por inserir estruturas de controlo (do tipo IF, IF-ELSE, IF-ELSEIF e IF-ELSEIF-ELSE) para condicionar o tipo de comandos a executar para escrever o programa NC. A utilização deste tipo de estruturas tornou-se essencial, por exemplo, para tentar aplicar duas situações consideradas vantajosas no pós-processamento:

- Controlar o bloqueamento dos eixos A e B, em maquinagem a 3+2 eixos, por se pretender omitir o conjunto de comandos “desbloqueio de eixos; posicionamento dos eixos A e B; bloqueio de eixos” entre percursos de um único programa NC, quando entre um e outro não ocorria qualquer mudança do valor do eixo A ou B;
- Definir os valores de B dentro dos limites aceites pelo controlador do CM: apesar de, teoricamente, serem ilimitados, foi verificado ao correr programas com utilização de 5 eixos contínuos que, a nível do controlador, ocorre um erro de “excesso de limite de eixo B” quando o valor de B no programa NC é, em módulo, de aproximadamente 13000°. Nesse sentido, para permitir a utilização deste equipamento neste tipo de aplicações, seria favorável condicionar os valores que ocorrem no programa NC, de forma a respeitar os limites do controlador, mantendo o efeito da rotação. Para obter esse resultado, teve de ser feita uma conversão a nível da escrita do programa, de forma a confinar os valores de B entre 0° e 360°. A

figura 11-A em anexo representa um fluxograma da conversão, bem como as definições utilizadas no ficheiro de configuração para esse efeito. De forma a averiguar a viabilidade desta conversão, tiveram também de ser feitos testes com utilização de 5 eixos contínuos, que se tratava de um tipo de maquinagem até aí nunca testado neste equipamento em particular.

5.7. PROGRAMAÇÃO CAM DE MODELOS PARA MAQUINAGEM NO ROBÔ PARA MOLDES, COM RECURSO ATÉ 5 EIXOS CONTÍNUOS DE MOVIMENTO

Uma vez que o grau de complexidade das peças mais comuns no CEIIA nem sempre justifica a utilização de estratégias a 5 eixos contínuos, são por vezes testados modelos externos com o intuito de conhecer o comportamento do equipamento nesse tipo de movimentos, verificar o cumprimento de tolerâncias e estudar quais as estratégias mais apropriadas para obter a forma final, de forma a ganhar experiência e agilizar a programação CAM e maquinagem, quando surgem peças com essa exigência. O modelo CAD representado na figura 18 surgiu nesse contexto, por apresentar uma geometria complexa, cuja programação, em particular para a fase de acabamento, constitui um desafio por exigir frequentemente a reorientação do eixo da ferramenta.

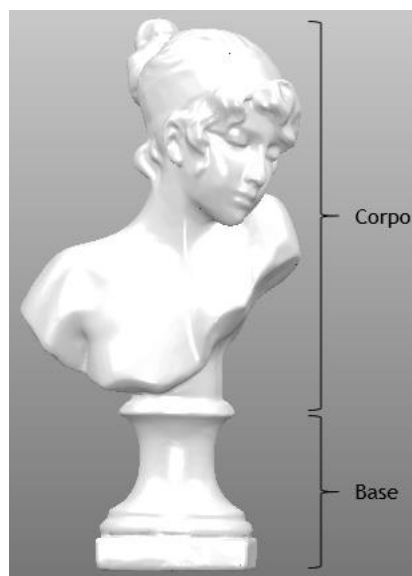


Figura 18 - Modelo CAD abordado, para o qual foi considerada uma altura de aproximadamente 560 mm e uma divisão em corpo + base, para fins explicativos [21].

Por se ter abordado o modelo na perspectiva de uma possível maquinagem com o robô para moldes, a questão do posicionamento do bloco em relação ao equipamento tem uma grande influência nas operações que podem ser efetuadas em cada área da

peça, devido às limitações que pode trazer ao movimento, sendo por isso recomendável defini-la desde o início da programação CAM. Tendo em conta que a programação “off-line” de um robô através do PowerMILL Robot Interface implica sempre a simulação de percursos para poder gerar programas NC, está disponível no CELIA a célula robótica de cada um dos equipamentos deste tipo. Atualmente, como foi possível ver na figura 5, os blocos a maquinar são colocados sobre uma mesa de apoio, com uma altura definida. Como essa mesa não está representada na célula robótica, é necessário posicionar o modelo em relação ao robô no PowerMILL tendo em conta essa mesma altura, para poder obter resultados o mais próximo possíveis da realidade. Com o objetivo de minimizar a amplitude de movimentos necessária, é também normalmente centrado o modelo em relação à cabeça do robô na posição “home”, considerando uma vista de cima. No caso do modelo mencionado, optou-se por aproximar um pouco mais o modelo ao robô, sendo escolhido o “queixo” da estátua para a posição mais afastada, por se ter considerado, através de uma análise visual, que haveria um menor risco de atingir os limites axiais do robô em relação à situação em que o modelo era colocado ao contrário (ver figura 12-A em anexo).

Uma vez que é necessário, não só garantir percursos livres de invasões e colisões, mas também que os movimentos possam ser efetuados pelo robô, a simulação com o *plug-in* torna-se bastante prática por permitir ajustar parâmetros de simulação, como a liberdade de movimentação linear ou angular a atribuir a cada um dos 6 eixos ou o ajuste da posição inicial de cada eixo. Tal como referido anteriormente, a modificação de percurso pode também ser necessária para conseguir obter resultados aplicáveis às condições de maquinagem do robô, sendo que a definição e edição de percursos para esse fim acaba também por se tornar mais intuitiva quando utilizada em conjunto com as funcionalidades do *plug-in*, por permitir visualizar os possíveis posicionamentos do robô e aferir se será realmente necessária uma redefinição do percurso. No entanto, é de realçar que o ficheiro MTD deste robô não tem presentes todos os elementos do espaço de trabalho real (como, por exemplo, a mesa de apoio), o que significa que mesmo as simulações bem sucedidas não devem ser interpretadas como uma representação absolutamente aplicável à realidade.

Na programação CAM da parte do “corpo” do modelo, por esta apresentar uma forma irregular, foram definidas e calculadas estratégias de acabamento por projeção de ponto ou de linha, de acordo com os resultados mais favoráveis para a

zona a que as mesmas eram aplicadas. No entanto, a questão da simulação limitou bastante as opções que poderiam ser escolhidas, por dar uma perspectiva dos movimentos que o robô poderia efetivamente executar. A título de exemplo, apesar de, através de uma estratégia de *acabamento por projeção de linha* ser sido gerado um percurso que inclui praticamente toda a zona do “tronco”, apenas foi possível obter uma simulação aceitável com o modelo do robô disponível, dividindo o percurso e ajustando parâmetros de simulação e de limitação do ângulo do eixo da ferramenta. Os segmentos de percurso iniciais e finais desta situação estão representados na figura 19.

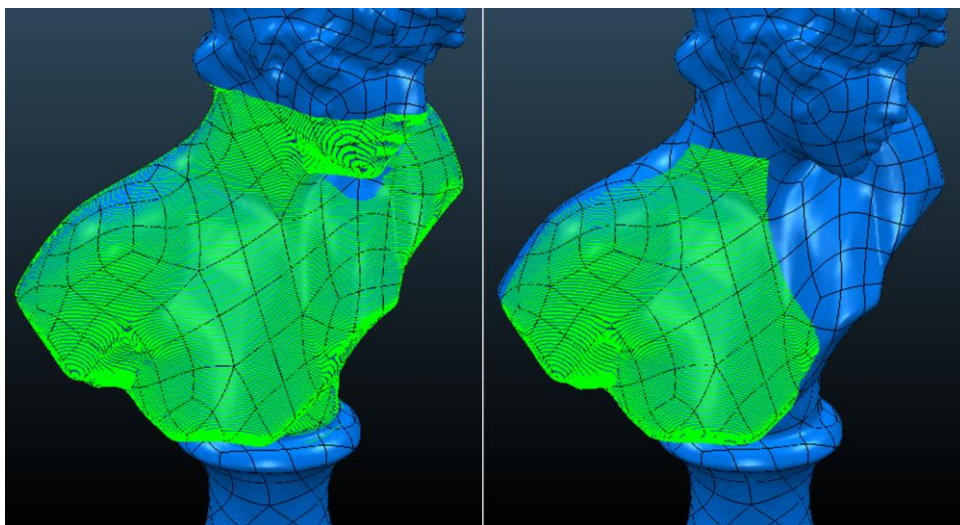


Figura 19 - Segmentos do percurso inicialmente obtido (à esquerda), em comparação com os segmentos contidos no percurso alterado, que viria a ser simulado sem ocorrência de colisões (à direita) [23].

No contexto do “corpo”, dada a dificuldade em obter percursos que simultaneamente dessem bons resultados na simulação e abrangessem grandes partes do modelo, o acabamento obtido na maquinagem com base nos percursos que foram simulados com sucesso seria muito provavelmente de má qualidade, por não existir coerência, por exemplo, em termos de direção de corte. No entanto, ao sobrepor os segmentos dos percursos e ao calcular um modelo maquinado baseado nos mesmos (e nos percursos calculados para desbaste, re-desbaste e semi-acabamento), foi possível ter a ideia de que abrangeriam uma grande área da superfície do modelo (figura 13-A em anexo).

Apesar de acabar por não se ter procedido à maquinagem da peça, este exercício permitiu uma melhor preparação para posterior programação de estratégias que

utilizam 5 eixos contínuos e alguma familiarização com a simulação e ajuste de parâmetros através do PowerMILL Robot Interface.

No âmbito de um projeto que envolveu o fabrico de um molde para um barco, as meias moldações foram divididas em diversos modelos, de forma a poder maquinar blocos de tamanho inferior, que seriam posteriormente montados. Apesar de uma grande parte desses modelos poder ser maquinada recorrendo apenas a estratégias com 3 eixos, existiam alguns com pormenores que justificavam a utilização de estratégias com variação da orientação do eixo da ferramenta. Por se tratarem de peças de grandes dimensões (que não caberiam no CM da Haas com o prato divisor montado) e por as tolerâncias dimensionais necessárias assim o permitirem, foram maquinadas com o robô para moldes.

De forma a consolidar e aplicar conhecimentos de programação CAM com recurso a 5 eixos contínuos, foram abordados dois dos modelos em questão (ver figura 20), que, por serem maquinados no robô, permitiram simultaneamente a utilização do *plug-in* para simulação e programação “off-line” deste tipo de equipamentos.

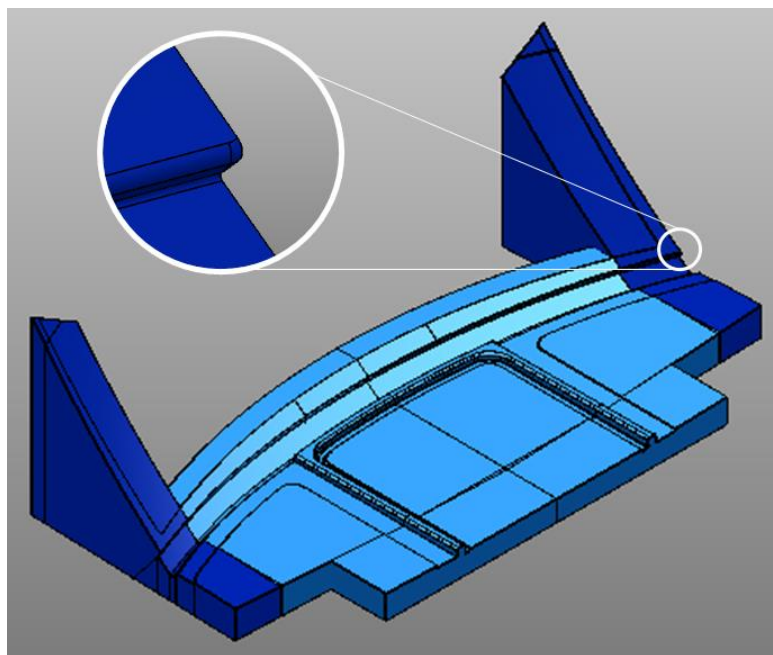


Figura 20 - Modelos CAD analisados. Por serem simétricas, as partes a azul escuro foram consideradas apenas um modelo, e correspondem, na zona da base, a uma continuação do modelo a azul claro. Em destaque, encontra-se o limite de uma zona que não pode ser maquinada a 3 eixos na mesma amarração em que é maquinado o resto do modelo [21].

À semelhança do que ocorreu nos projetos em 5.4 e 5.5, foi feita uma análise da geometria específica de cada modelo, sendo aplicadas na fase de acabamento diferentes estratégias a 3 eixos, de acordo com a geometria local: estratégias de

cópia para zonas planas, estratégias de *Z constante* para zonas inclinadas, estratégias específicas para *cantos* nas zonas em que era necessário um diâmetro de fresa reduzido e estratégias de *cantos pencil* para maquinar arestas que deveriam permanecer vivas na peça final. Nesta fase da programação CAM, a grande diferença em relação à programação para um CM é a utilização da redistribuição de pontos, que não modifica a visualização gráfica do percurso no PowerMILL mas é aconselhável para a programação “off-line” de robôs. No entanto, após a definição desses percursos, a programação da zona que se pretende destacar na figura anterior exigia ainda, para ambos os modelos, a programação de estratégias com 5 eixos contínuos.

Nesta fase, os conhecimentos adquiridos com a programação CAM da “estátua” (figura 18) permitiram uma escolha informada da estratégia a utilizar, por existir um conhecimento mais profundo de cada uma. Para obter o efeito desejado, optou-se então por uma estratégia de *acabamento por projeção de linha*, limitando o padrão projetado para incluir apenas a zona a maquinar: foi escolhida uma linha vertical fora do modelo, de forma a que o diâmetro do padrão circular fosse semelhante ao do semicírculo que a zona inclinada segue; foi modificado o ângulo de elevação do padrão, para garantir que as superfícies a maquinar eram abrangidas; foram adaptados os valores de altura e de ângulo azimutal para limitar a ação do padrão (ver figuras 14-A e 15-A em anexo). Para o eixo da ferramenta, foi escolhida a definição por “aproximação/inclinação” em relação à normal de projeção do padrão, utilizando nesta fase ângulos de aproximação e de inclinação iguais a zero.

Após o posicionamento da célula robótica (ver figura 16-A em anexo), foi simulada cada uma das estratégias a 3 eixos, utilizando um controlo vetorial para o eixo da cabeça do robô: ao definir o vetor como correspondente ao eixo da cabeça do robô na posição “home”, esta mantém essa mesma direção durante toda a simulação. Para os percursos em questão, as simulações obtidas não apresentaram quaisquer problemas, sendo então utilizadas para gerar programas NC para o robô. No entanto, para a zona a maquinar a 5 eixos contínuos, foi necessário modificar parâmetros de simulação e até mesmo modificar parâmetros do percurso, por surgirem na simulação singularidades, alcance do limite de eixos e colisões com o modelo.

Por se concluir que a cabeça do robô, ao utilizar a normal de projeção como direção do eixo da ferramenta, colidia com o modelo, foi ajustado o ângulo de

inclinação em relação a essa direção, tendo-se chegado a resultados positivos com o valor de 25°. A nível do *plug-in*, para obter a simulação final, foi também modificado o vetor de controlo e a posição inicial da cabeça do robô. Para este tipo de estratégias, a simulação torna-se crucial para obter resultados que não ponham em causa a integridade da peça, uma vez que, para conseguir o raio pretendido, a ponta da ferramenta precisa de ter o máximo de diâmetro possível em contacto com essa zona, implicando, neste caso, uma proximidade que exige atenção ao resto do modelo (ver figura 21).

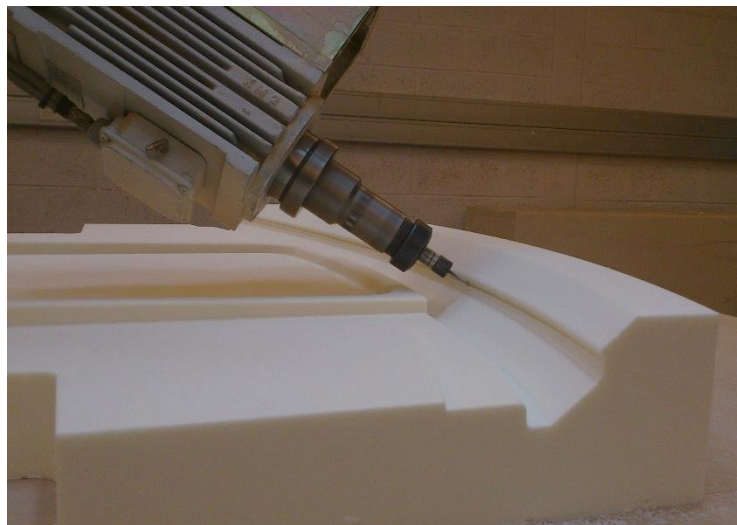


Figura 21 - Posição incluída na maquinagem da zona sujeita a um percurso com 5 eixos contínuos.

5.8. PROGRAMAÇÃO CAM DE MODELOS A CORTAR COM O ROBÔ DE CORTE POR JATO DE ÁGUA E ACOMPANHAMENTO DOS RESPETIVOS CORTES

No contexto dos projetos do CEIIA, o corte por jato de água é frequentemente utilizado para corte de chapas (cuja fixação na grelha do tanque é feita através de grampos) ou para definir o perfil de peças obtidas por outros processos. Particularmente no corte bidimensional, a programação CAM necessária é bastante repetitiva. Por isso mesmo, foram utilizadas as macros desenvolvidas (referidas no projeto em 5.2) para efetuar algumas operações.

De acordo com o que foi referido em relação às macros para este processo, e utilizando o modelo presente na figura 22 como exemplo, é inicialmente criado, com o auxílio de um bloco, um plano de trabalho, no topo, num dos cantos, de forma a poder posteriormente alinhar o modelo com o modelo do robô, na fase de simulação. Uma vez que a compensação linear necessária para este robô é feita a nível da

aplicação CAM, o modelo é transformado com uma escala de 1,0032 ao longo do eixo das ordenadas.

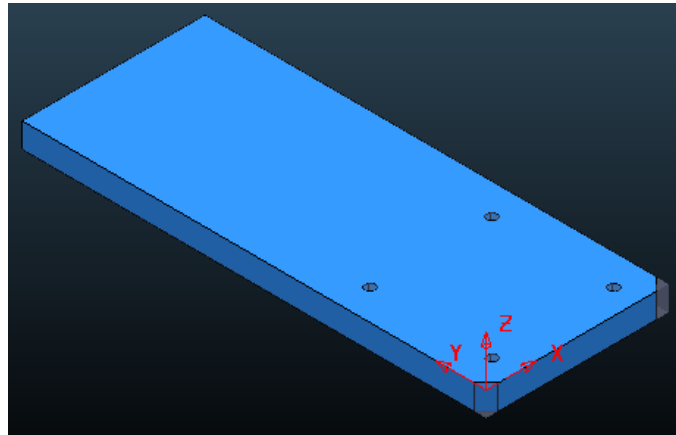


Figura 22 - Modelo CAD de chapa a cortar por jato de água, estando também representado o plano de trabalho ativo [23].

Tendo em conta que apenas a superfície do topo será utilizada como referência, a mesma é selecionada para criar um padrão correspondente à geometria do modelo. Após seleção, é criado um padrão que, depois de ter inserida a geometria pretendida, é transformado através de um *offset* de 0,35 mm. Dado que a ferramenta a utilizar no PowerMILL é recorrente, esta é criada no projeto através da respetiva macro. Uma vez que as definições utilizadas na estratégia de acabamento por padrão praticamente não variam neste tipo de peças, foi também neste exemplo utilizada a macro para definir e calcular o percurso, restando apenas ajustar os parâmetros de velocidade e avanço, entradas/saídas do percurso e ordem e direção dos segmentos.

Em termos de programação CAM, é ainda importante referir que, antes do pós-processamento, todos os percursos necessários são simulados com o ficheiro MTD do robô, sendo utilizado na simulação um controlo da ferramenta vetorial, por se tratarem de movimentos simples. No que toca ao ajuste de parâmetros do percurso acima referidos, é necessário entender a interação com o processo: conhecer as limitações do processo e do material, dispor os modelos a cortar de forma a aproveitar ao máximo a matéria-prima disponível, conhecer as tolerâncias admitidas para as cotas do modelo.

Quanto à definição de entradas e saídas do percurso, é importante referir que existe um tempo de perfuração, que depende da espessura e material da placa, durante o qual não é recomendável o jato atingir o limite da cota, por não ter a

precisão mais indicada; por isso mesmo, a aplicação de entradas e saídas é fundamental neste processo. Nesse sentido são, por norma, aplicadas entradas e saídas do tipo centro de cavidade para os furos, de forma a não danificar a chapa envolvente, sendo aplicadas entradas e saídas do tipo arco horizontal para os contornos (ver figura 23). Os parâmetros utilizados neste último variam mas é geralmente utilizada uma conjugação de ângulo e raio que não provoque uma entrada muito abrupta e com um tamanho pequeno, para aproveitar ao máximo o rendimento da chapa.

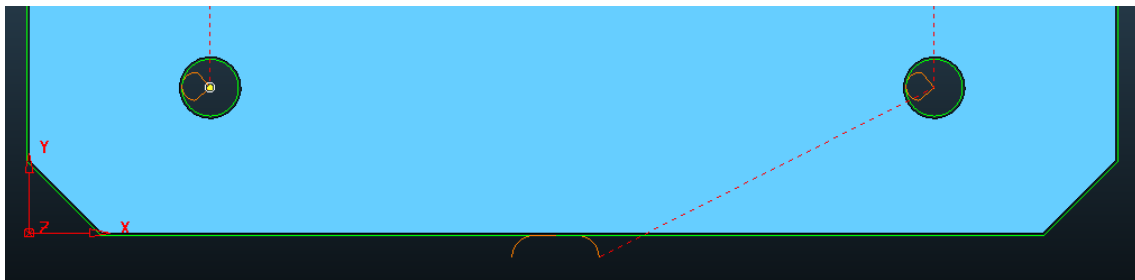


Figura 23 - Vista de cima do modelo, com entradas e saídas de percurso definidas (a laranja). Para os furos foi utilizado o tipo centro de cavidade e para o contorno foi utilizado arco horizontal com distância e raio de 3 mm e ângulo de 90° [23].

Por questões de fixação, são quase sempre feitos os furos em primeiro lugar, sendo posteriormente feitos os contornos da geometria. Nesse sentido, as ferramentas de edição de percurso são quase sempre utilizadas para reordenar segmentos, sendo também frequentemente necessário alterar a sua direção, para que as entradas e saídas sejam calculadas do lado de fora do modelo. Isto porque não é raro obter resultados como o da figura 24, mesmo utilizando verificação de invasão ao calcular as entradas/saídas.

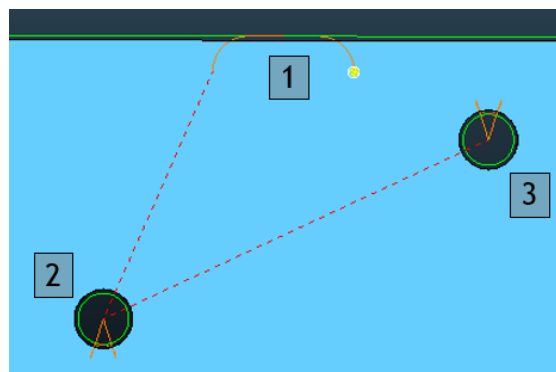


Figura 24 - Exemplo de primeiro cálculo de entradas e saídas obtido para um modelo a cortar por jato de água. A laranja estão representadas as entradas e saídas de percurso, estando ainda representada a ordem dos segmentos (1 a 3) [23].

A escolha da velocidade de corte é feita de acordo com o material e espessura da placa, sendo no entanto reduzida nas zonas com mudança de direção de corte, através do controlador do robô ou através da aplicação CAM (como foi referido em 5.3.4). Paralelamente às questões associadas ao robô, uma vez que a ferramenta utilizada não é sólida, quando há movimento da ponteira, este processo apresenta sempre alguma variação de cotas ao longo da espessura da placa. Este fenómeno, conhecido como *jet lag*, surge da variação entre a posição do fluxo na superfície e na base, causada pelo atraso do movimento em profundidade (ver figura 25) [27].

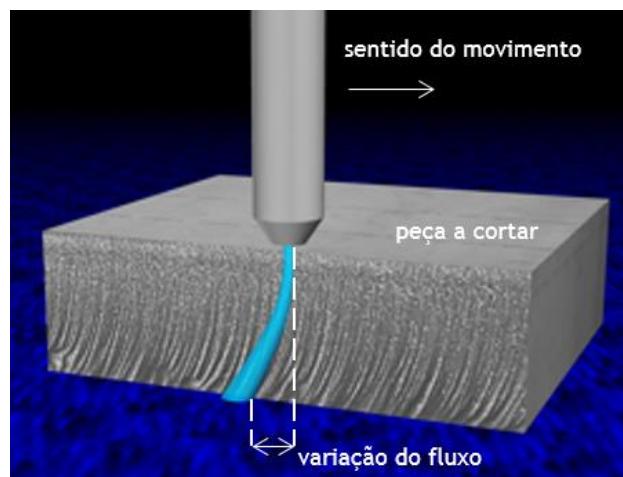


Figura 25 - Efeito do *jet lag* na qualidade superficial da peça [28].

Apesar do *jet lag* não ser considerado crítico em movimentos lineares, desde que utilizada uma velocidade de corte adequada, quando existe mudança de direção o fluxo na base vai ter maior dificuldade em acompanhar o movimento do fluxo no topo, acentuando o efeito do fenómeno. Nessas zonas do percurso torna-se então necessário reduzir a velocidade, para permitir que o fluxo se mantenha o mais vertical possível [27].

Na figura 26 é possível verificar o efeito da redução da velocidade de corte, na geometria de material proveniente de dois furos numa placa de aço com 20 mm de espessura. Utilizando a mesma velocidade de corte no projeto de PowerMILL (60 mm/min), foi utilizada localmente uma velocidade de 30% desse valor, sendo posteriormente reduzida para 20%, num furo de maior diâmetro. Apesar do diâmetro do furo ter alguma influência na variação, por serem necessárias mudanças mais bruscas no furo de menor diâmetro, a variação da cota mais acentuada na geometria desse mesmo furo deveu-se principalmente à velocidade de corte excessiva. Na figura 27 é ainda representado o efeito da mudança de direção na zona de entrada

e saída do contorno, que acaba por ser bastante difícil de evitar, mesmo ajustando a velocidade de corte local. Na mesma figura é ainda possível identificar marcas resultantes do fenómeno de *jet lag* acima mencionado.

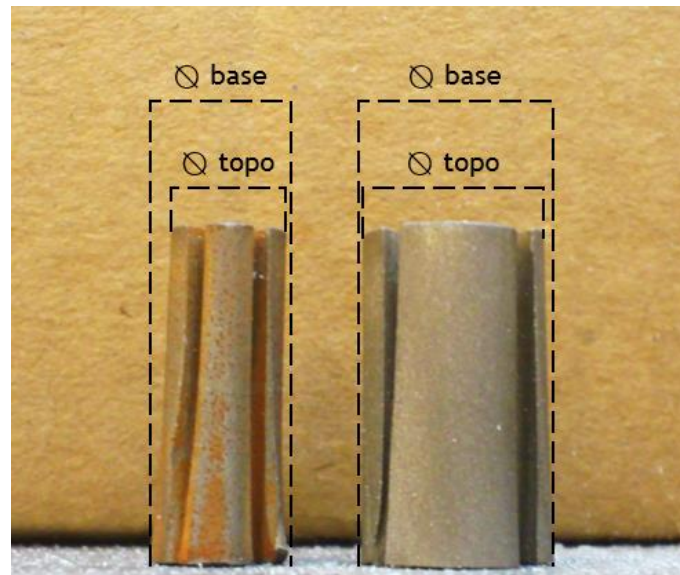


Figura 26 - Diferença entre o diâmetro da base e do topo em dois furos retirados de uma chapa de aço com 20 mm de espessura. No furo de menor diâmetro (à esquerda) foi utilizada uma velocidade de corte excessiva, causando uma maior variação.

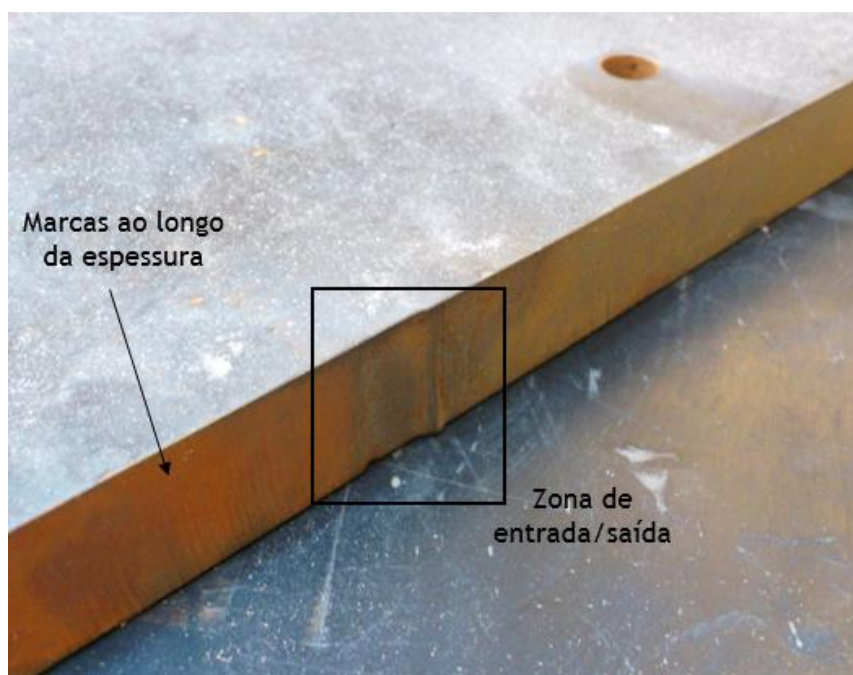


Figura 27 - Marca deixada na peça pelo jato de água na zona de entrada/saída e ao longo do percurso.

Tal como referido anteriormente, no contexto do CEIIA, este processo de corte é maioritariamente aplicado a situações de maquinagem bidimensional. No entanto, torna-se por vezes necessário aplicá-lo a perfis que exigem a utilização de

reorientação do eixo da ferramenta, como é o caso do corte a efetuar para obter a forma do modelo CAD presente na figura 28.

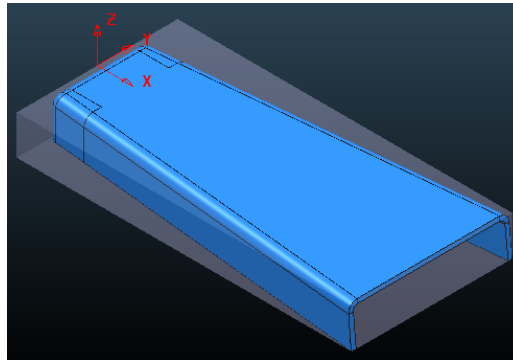


Figura 28 - Modelo CAD a obter por corte por jato de água, estando também representados o bloco admitido e o plano de trabalho ativo [23].

À semelhança do que é feito para outros modelos, foi abordada não só a geometria do modelo a cortar, mas também a questão do posicionamento e fixação da peça original (feita num material compósito, não magnético). Por já terem sido cortadas peças semelhantes, foi utilizado um gabari construído anteriormente, para servir como encosto para posicionar a peça. Para além dessa estrutura metálica, foram também utilizados grampos para a fixar e posicionar na grelha, um bloco maciço para o centro (de forma a evitar que o jato atravessasse a peça em duas superfícies) e ímanes para manter a peça na posição certa em relação ao gabari (ver figura 29).



Figura 29 - Para posicionar a peça é utilizado um gabari em aço, fixado por grampos, sendo ainda colocado um bloco de aço no centro. Para manter a peça fixa em relação ao gabari, são colocados ímanes acima da mesma. Entre os ímanes e a peça é ainda utilizado um plástico, para minimizar as marcas deixadas pelos mesmos.

No que toca à programação CAM envolvida, foi criado um plano de trabalho o mais favorável possível à criação de referências no controlador do robô (no caso, coplanar com as superfícies do topo e frente, no ponto central do modelo em Y), sendo feita mais uma vez uma escala ao longo de Y de 1,0032.

Para o corte, por existirem superfícies com qualidade para tal e por se tratar de uma estratégia que apresenta geralmente um bom resultado na definição da orientação do eixo da ferramenta, foi calculado um percurso do tipo acabamento *swarf*, utilizando as superfícies limitantes, com entrada e saída do tipo arco horizontal (ver figura 30).

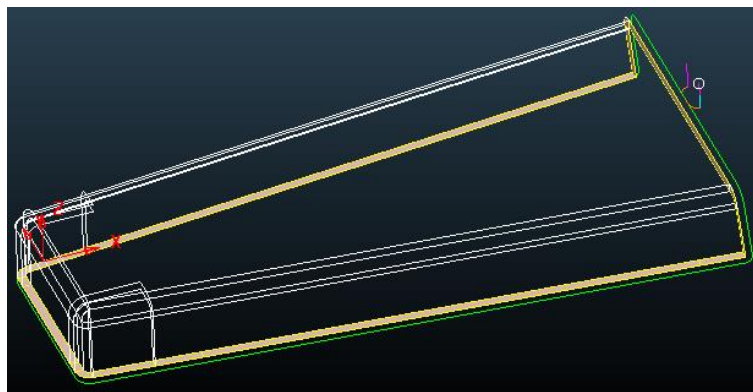


Figura 30 - Superfícies selecionadas e percurso obtido através da estratégia swarf. Foi escolhido um ponto inicial em que a ferramenta pode utilizar um eixo vertical, sendo utilizadas entrada e saída do tipo arco horizontal [23].

Na fase final da programação, a trajetória foi simulada com o *plug-in* para programação de robôs, não só devido a questões de pós-processamento mas também por ser essencial obter simulações com a maior aproximação à realidade possível (ver figura 31). De facto, nos casos particulares em que são utilizados todos os eixos do robô, a simulação acaba por ter um papel ainda mais importante para controlar a rotação, por existir maior tendência a gerar situações de singularidade. Quando tal ocorre, apesar da simulação poder ser considerada viável pelo que é representado no *software*, o robô vai, na prática, ajustar a sua rotação para evitar singularidades, podendo atingir os limites de rotação dos eixos ou, no limite, colidir com o modelo ou com outros elementos presentes no espaço de trabalho.

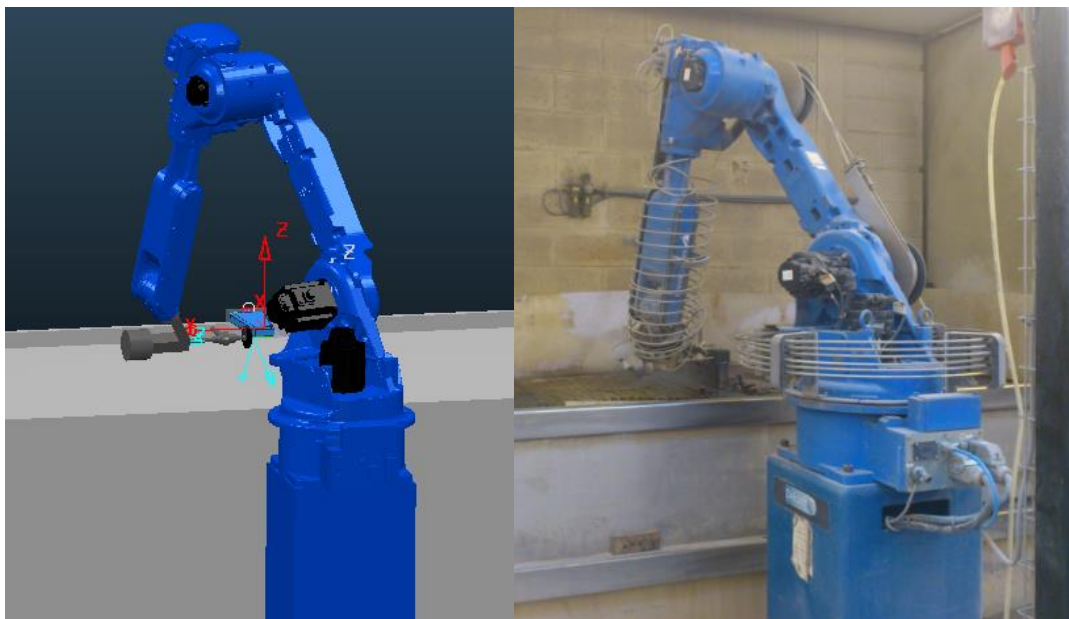


Figura 31 - Imagem obtida na aplicação CAM (esquerda), em relação ao que ocorre no corte (direita) [23].

6. CONCLUSÕES

No âmbito do estágio no CEIIA foram abordados todos os processos que envolvem a utilização dos equipamentos com CNC disponíveis, incentivando uma familiarização com diversos tipos de programação CAM, de forma a cumprir o principal objetivo do estágio. Através dessa abordagem foram identificadas operações às quais poderiam ser aplicados automatismos auxiliares, sendo desenvolvidas macros para o *software* CAM utilizado.

A fase de identificação de operações envolveu não só o contacto com a programação CAM mas também a interação com os programadores do CEIIA, o que veio a realçar a opinião de que a abordagem a um mesmo tipo de programação varia de pessoa para pessoa. Por isso mesmo, a frequência de utilização das macros desenvolvidas difere entre operadores, apesar da abordagem ter visado também a uniformização de procedimentos. No que toca a esses projetos, os resultados obtidos foram particularmente relevantes para a programação do corte bidimensional por jato de água, cujos automatismos auxiliares passaram a estar sempre incluídos na programação, reduzindo significativamente o tempo despendido e facilitando a programação para operadores com menor nível de formação.

Por necessidade da empresa, houve ainda envolvimento no desenvolvimento de um ficheiro de configuração, o que possibilitou não só a aquisição de conhecimentos

na área do pós-processamento para obter programas NC, mas também uma melhor compreensão do que ocorre a nível de operação com sistemas de 3+2 e 5 eixos contínuos. Particularmente na etapa de teste do pós-processamento para maquinaria a mais de 3 eixos, houve necessidade de abordar com a equipa do CEIIA questões como a instalação do prato divisor, determinação do ponto pivô e ajuste de definições no controlador do equipamento e no projeto de PowerMILL. Consequentemente, apesar de poderem ainda existir parâmetros por ajustar (como a maquinaria a 5 eixos contínuos), houve uma confirmação de procedimentos, que contribuiu diretamente para o aumento da confiança e frequência de utilização do divisor.

O facto de os projetos terem sido desenvolvidos no contexto de um estágio foi particularmente interessante por serem abordadas necessidades reais, existindo uma proximidade à situação principalmente conseguida através da presença nas instalações. O estudo de diversas tecnologias promoveu também a aquisição de conhecimentos de base para enfrentar desafios nesta área, tendo sido curioso verificar a aplicação industrial de conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Leatham-Jones, Barry. *Introduction to Computer Numerical Control*. London: Pitman, 1986.
- [2] Teicholz, Eric. *CAD/CAM Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [3] Delcam. *PowerMILL 5-axis: Training Course*. 2013.
- [4] McMahon, C. and Browne, J.. *CADCAM: Principles, Practice, and Manufacturing Management*. Harlow, England: Addison-Wesley, 1998.
- [5] Relvas, Carlos. *Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais*. Porto: Publindustria, 2002.
- [6] Dassault Systèmes. *Catia*. Disponível em: <http://www.3ds.com/products-services/catia/>. Acedido a 29 de maio, 2015.

- [7] Delcam. *Delcam Exchange: Powerful, easy-to-use, secure translation of CAD data*. Disponível em: <http://www.delcam-exchange.com>. Acedido a 6 de abril, 2015.
- [8] Delcam. *PowerMILL: Training Course*. 2012.
- [9] Delcam. *PowerMILL Robot: Overview of Delcam's robotic machining solution*. Disponível em: <http://www.delcam-robotics.com/overview/index.asp>. Acedido a 6 de abril, 2015.
- [10] Norcam, Engenharia e Design Industrial. *Delcam Post Processor Training*. 2013.
- [11] Awea. *AWEA CNC Vertical Machining Center BM Series*. Disponível em: http://www.awea.com/awea_en/milling/vertical/bm/specifications.htm. Acedido a 24 de março, 2015.
- [12] Haas Automation, Inc. *Haas VF-11/40*. Disponível em: https://www.haascnc.com/we_spec1.asp?id=VF-11/40&sizeID=120_150INCH_VMC#gsc.tab=0. Acedido a 24 de março, 2015.
- [13] Haas Automation, Inc. *Haas TR310*. Disponível em: https://www.haascnc.com/mt_spec1.asp?id=TR310&webID=5AXIS_RT_ROTARY#gsc.tab=0. Acedido a 24 de março, 2015.
- [14] Mourtzis, D.. *Computer Numerical Control of Machine Tools*. Universidade de Patras, Grécia, 2013. Disponível em: http://www.lms.mech.upatras.gr/LMS/files-1/students-area/arithmetikos-elegkhos-ergaleiomekhanon/subject-files/ekpaideutiko-uliko/CNCChapter16_15012014_LOCKED.pdf. Acedido a 3 de junho, 2015.
- [15] Yaskawa Motoman Robotics. *HP20D-Series*. Disponível em: http://www.motoman.com/datasheets/HP20D_HP20D-6.pdf. Acedido a 24 de março, 2015.
- [16] Yaskawa Motoman Robotics. *ES165D/ES200D*. Disponível em: http://www.motoman.com/datasheets/ES165D_ES200D.pdf. Acedido a 24 de março, 2015.
- [17] Garcia, Joana. *Aprendizagem da linguagem de programação incluída na aplicação CAM "PowerMILL" da Delcam*. 2015.

- [18] Delcam. *PowerMILL 2015 User Guide: Macro Programming Guide*. 2014.
- [19] Delcam. *Delcam User Forum*. Disponível em: <http://forum.delcam.com/>
- [20] Delcam. *PowerMILL Robot Interface*. 2012.
- [21] Delcam. *PowerSHAPE-Pro 2015 R2*. Aplicação CAD.
- [22] Valentino, J. and Goldenberg, J.. *Introduction to Computer Numerical Control (CNC)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
- [23] Delcam. *PowerMILL 2015 R2*. Aplicação CAM.
- [24] Motoman. *DX100 Controller Operator's Manual: Basic Programming*. 2010.
- [25] Sika. *SikaBlock® M700*. Disponível em: http://deu.sika.com/dms/getdocument.get/41e4563b-b108-38c3-898b-80ab1827c97f/SikaBlock_M700_eng.pdf. Acedido a 7 de abril, 2015.
- [26] Disponível em: http://infosys.beckhoff.com/content/1033/tccncprogramming/Images/image40_242.png. Acedido a 3 de junho, 2015.
- [27] *Obtainable Tolerances with Waterjets*. Disponível em: http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=185&Itemid=54. Acedido a 17 de abril, 2015.
- [28] Adaptado de: <http://image.thefabricator.com/a/recent-developments-in-abrasive-jet-software-jet-lag-diagram.jpg>. Acedido a 20 de abril, 2015.
- [29] Adaptado de: http://www.azorobotics.com/images/equipments/EquipmentImage_116.jpg. Acedido a 26 de maio, 2015.
- [30] Delcam. *PostProcessor 2014 R2*. Aplicação.
- [31] Adaptado de: https://bobcad.com/Support_Videos/Multi-Axis/Finding%20the%20Center%20or%20Rotation%20for%20your%20Table%20Table%20Trunnion%20Unit.pdf. Acedido a 2 de junho, 2015.



Figura 1-A - Ferramentas de desbaste (fresa de topo à esquerda e ferramenta esférica à direita) utilizadas no robô ES165D. Ambas apresentam canais para, através da ferramenta, aspirar o material removido.

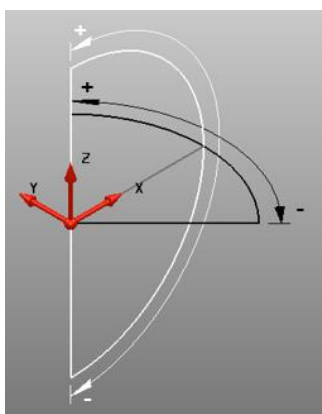


Figura 2-A - Sentido de variação dos ângulos azimutal e de elevação, a preto e branco, respetivamente [21].

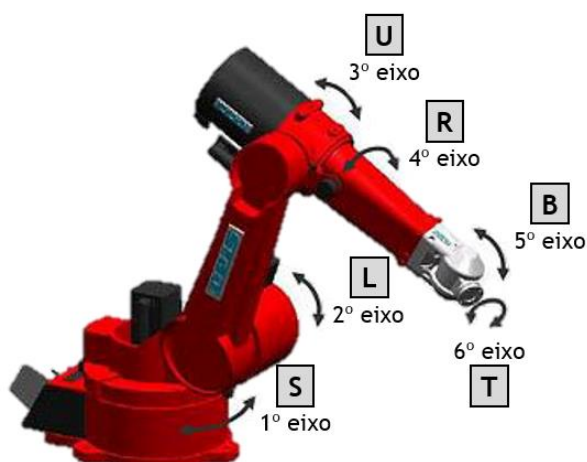
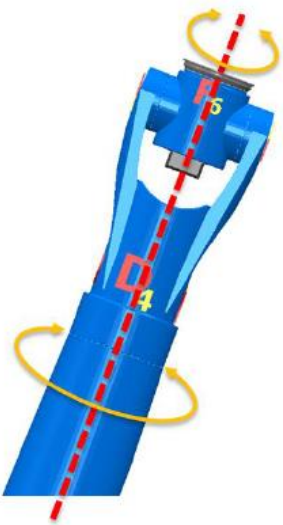




Figura 3-A - Representação dos sentidos de movimentação de eixos num robô industrial de 6 eixos; as letras representadas são as mesmas utilizadas pelo PowerMILL Robot Interface [29].

Tabela 1-A - Tipos de singularidade que ocorrem na programação de robôs [20].

Singularidade de punho	Singularidade de cotovelo	Singularidade de alinhamento
		
Envolve alinhamento do 4º e 6º eixo. É o tipo de singularidade mais comum.	Envolve alinhamento do 2º, 3º e 5º eixo.	Envolve alinhamento do 1º e 6º eixo.

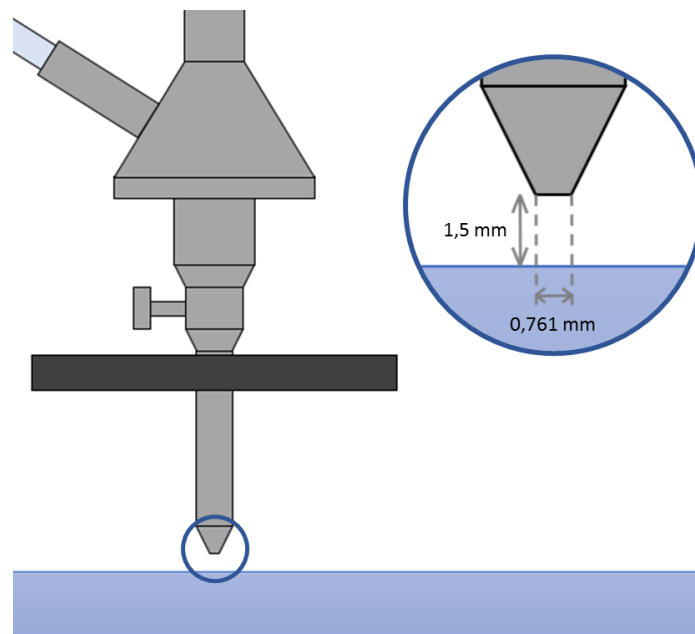


Figura 4-A - Posicionamento da ponteira do robô de corte por jato de água em relação à chapa a cortar. São ainda de destacar as dimensões a considerar para a ferramenta no projeto PowerMILL.

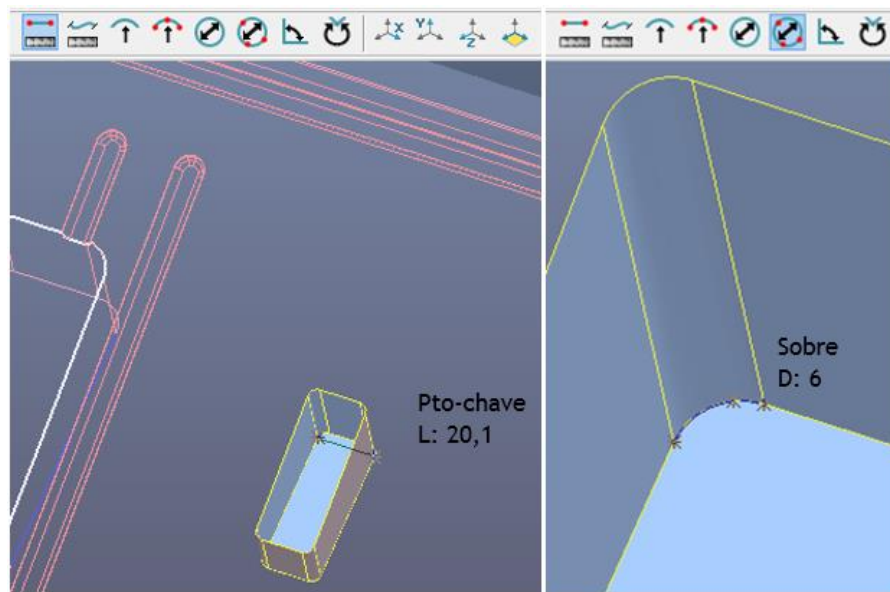


Figura 5-A - Resultados obtidos na medição da geometria de uma zona específica do modelo. À esquerda é utilizada a medição de distância entre dois pontos e à direita é utilizada a medição de diâmetro por três pontos [23].

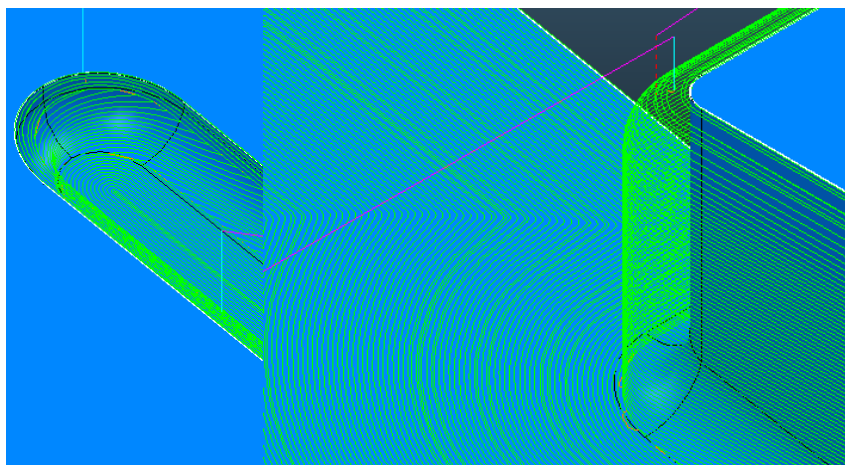


Figura 6-A - Detalhes de percursos obtidos com a estratégia de acabamento inclinado e raso [23].

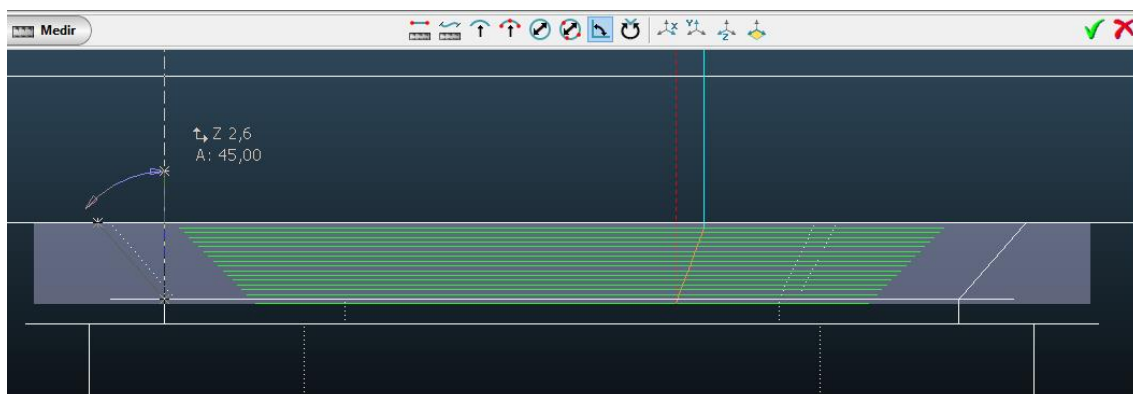


Figura 7-A - Medição da inclinação do chanfro presente no modelo [23].

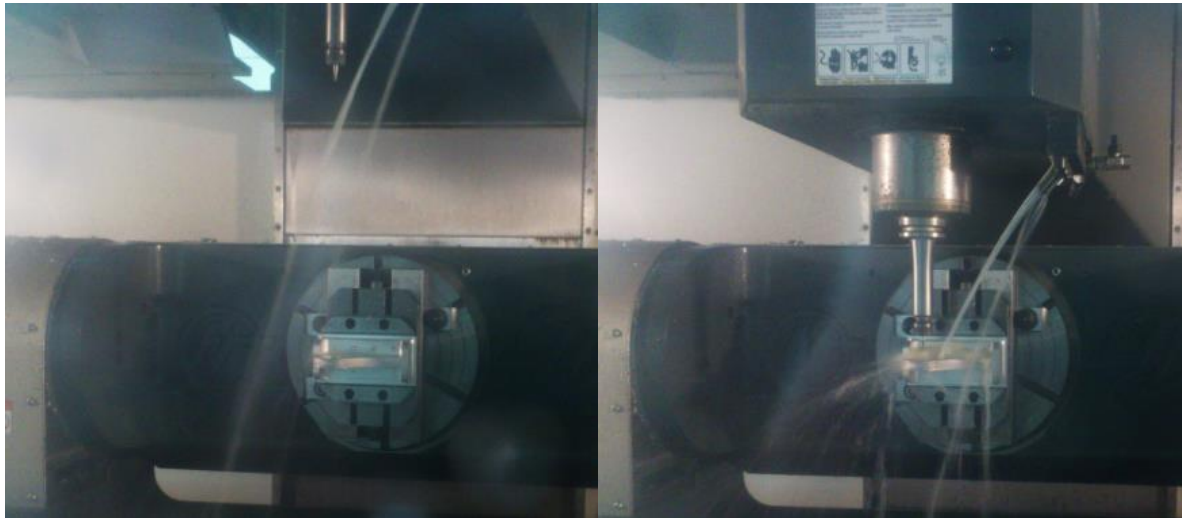


Figura 8-A - Ativação do sistema de refrigeração (à esquerda) antes de ser atingida a altura Z de segurança (à direita).

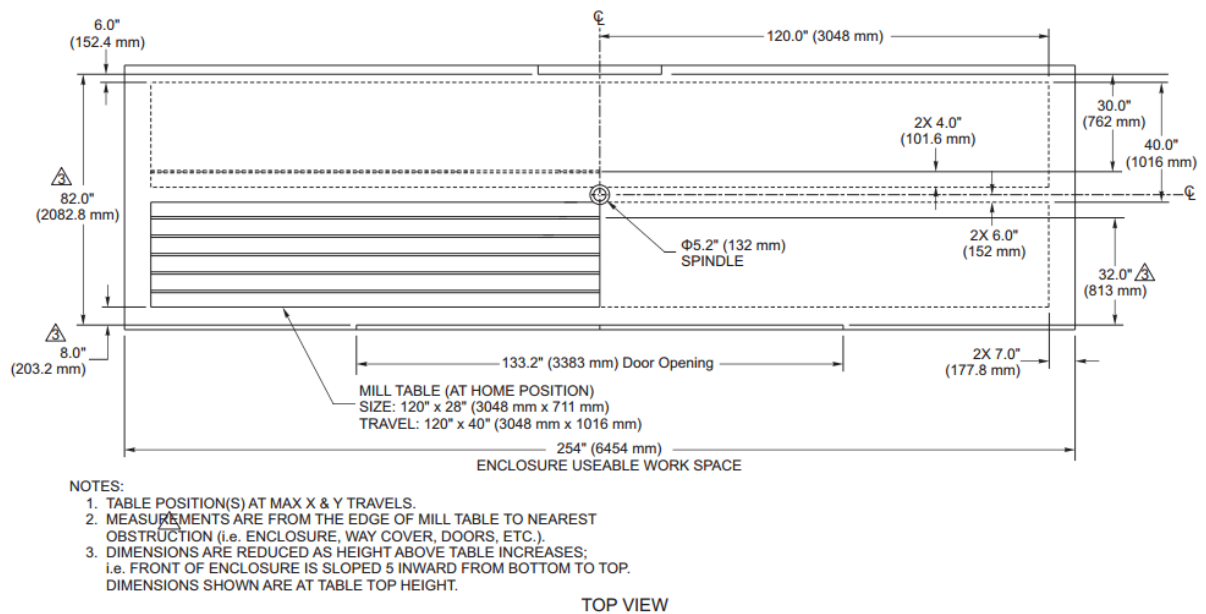


Figura 9-A - Vista de cima do espaço útil de trabalho do centro de maquinagem Haas VF11/40. É ainda de destacar que a mesa se encontra na posição “home”, que corresponde a X0 Y0 [12].

Option File Settings ✕

☒ Enable Automatic Coordinates Control

Profile

Multi-Axis Machine without RTCP ▾

Axis Mode	Pre-Set	Workplane Transformation	RTCP Mode	Tool Length Compensation
3 Axis	Pre-Set 1: Wo... ▾	Off	Off	Off
3 + 2	Pre-Set 1: Wo... ▾	Off	Off	Off
Multi - Axis	Pre-Set 1: Wo... ▾	Off	Off	Off

Kinematics Model

5-Axis Table Table ▾

Export...

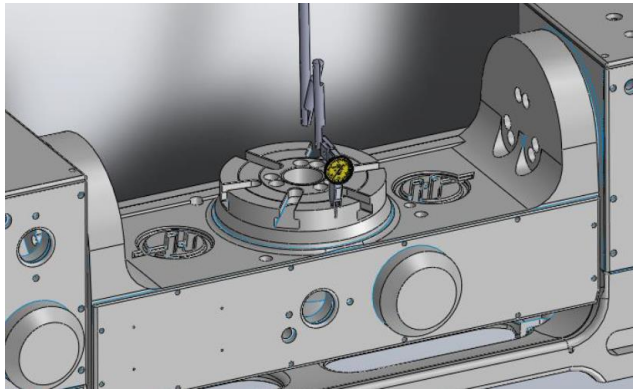
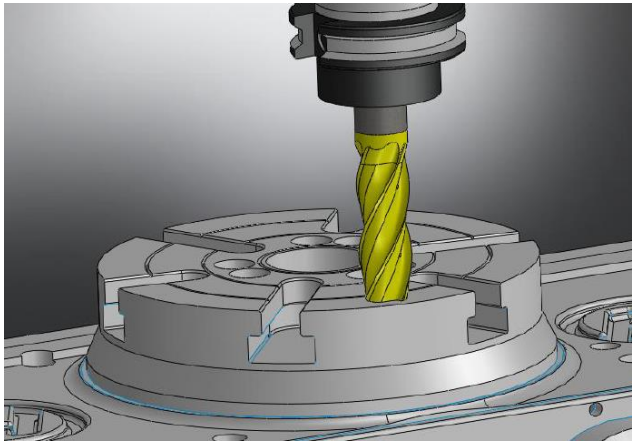
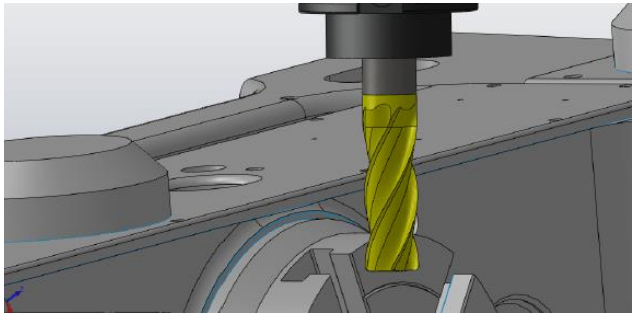
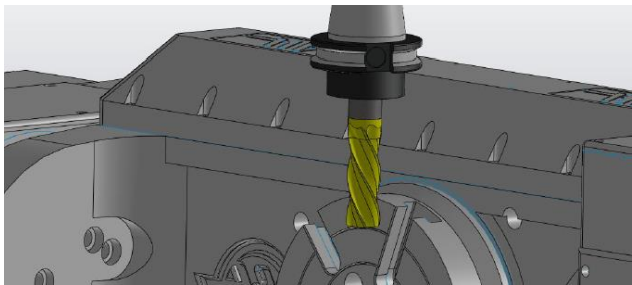
All linear values on this form are in millimetres. In order to convert inches to millimetres multiply by 25.4

Kinematics Chain

Order	Parameter	Directi...			Origin			Orient...			Limits				
		I	J	K	X	Y	Z	U	V	W	∞	Min	Initial	Max	
<i>Table</i>					0	0	0								
1st Rotary (A)	Machine B <input checked="" type="checkbox"/>	0	0	-1	0	0	0				<input checked="" type="checkbox"/>	-∞	0	+∞	
2nd Rotary (B)	Machine A <input checked="" type="checkbox"/>	1	0	0	0	0	0				<input type="checkbox"/>	-15	0	120	
1st Linear (X)	Machine X	-1	0	0							<input checked="" type="checkbox"/>	-∞	0	+∞	
2nd Linear (Y)	Machine Y	0	-1	0							<input checked="" type="checkbox"/>	-∞	0	+∞	
<i>Head</i>		0	0	1	0	0	100	1	0	0					
3rd Linear (Z)	Machine Z	0	0	1							<input checked="" type="checkbox"/>	-∞	0	+∞	

Figura 10-A - Definições de variação de coordenadas e de cinemática do equipamento, incluídas no ficheiro de configuração do pós-processador, para o centro de maquinagem da Haas [30].

Tabela 2-A - Procedimento para determinar o ponto pivô no modelo de prato divisor disponível no CEIIA [31].

Determinação do ponto pivô no prato divisor TR310 da Haas	
<p>Obter as coordenadas do centro (XY) do prato em A0 B0</p> <p>X_1 - Coordenada X do ponto pivô Y_1 - Coordenada Y do ponto pivô</p>	
<p>Determinar a coordenada Z do prato em A0 B0</p> <p>Z_1</p>	
<p>Determinar a coordenada Y (face do prato) em A = 90°</p> <p>Y_2</p>	
<p>Determinar a coordenada Y (face do prato) em A = -90°</p> <p>Y_3</p>	
<p>Calcular o acréscimo em Z (δ) que é necessário em relação a Z_1</p>	$\delta = (Y_2 - Y_3) / 2$
<p>Calcular a coordenada Z do ponto pivô</p>	$Z_{\text{ponto pivô}} = Z_1 + \delta$

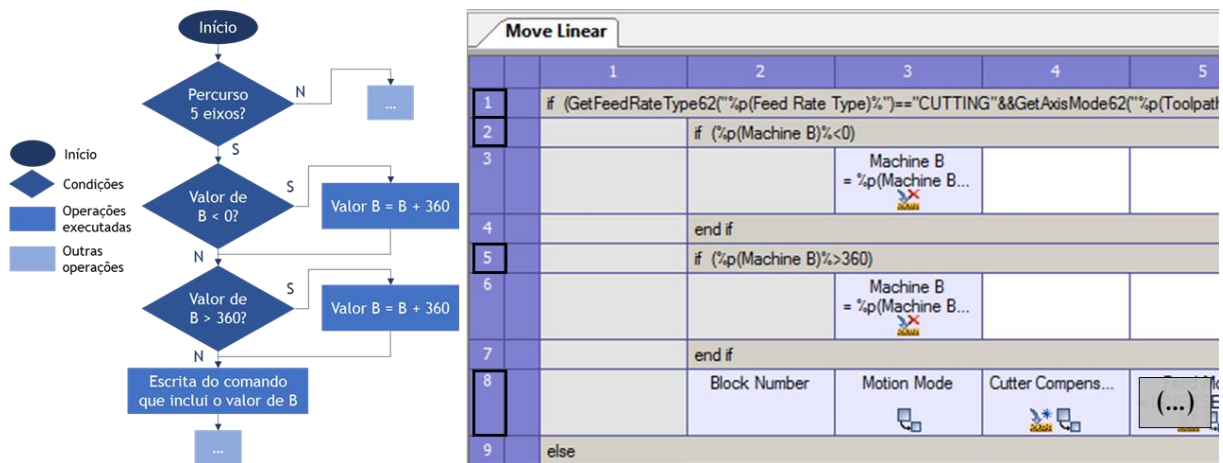


Figura 11-A - Através de estruturas do tipo IF e IF-ELSE, é feita uma verificação se o percurso é de 5 eixos (linha 1), sendo que quando a resposta é positiva, é feita uma verificação se o valor do eixo B é inferior a 0° (linha 2) ou superior a 360° (linha 5). Caso uma destas condições se verifique, é aplicado um cálculo ao valor de B, atualizando-o antes de o mesmo ser utilizado no próximo comando relativo ao movimento do percurso (linha 8), que será escrito no programa NC [30].

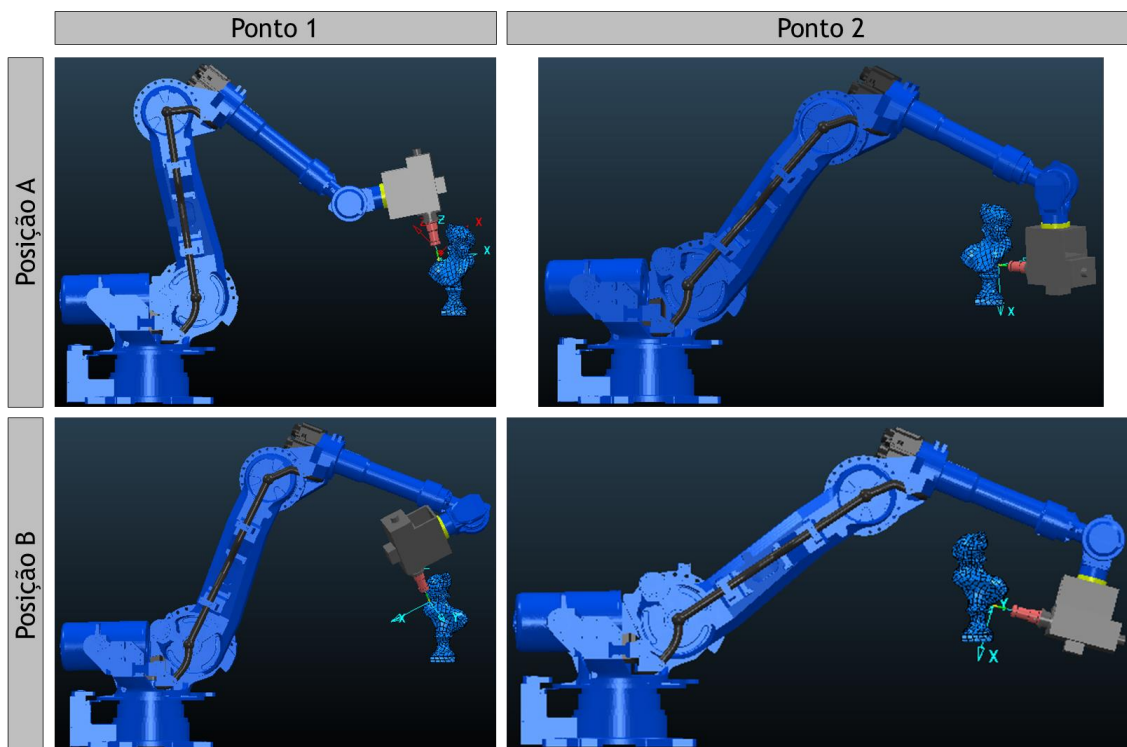


Figura 12-A - Comparação visual entre a posição que o robô assume para atingir um ponto aproximadamente na mesma zona (pontos 1 e 2), estando o modelo em duas posições diferentes (posições A e B). Acabou por ser escolhida a posição A, por se terem considerado mais acessíveis as posições assumidas pelo robô com o modelo nessa posição [23].

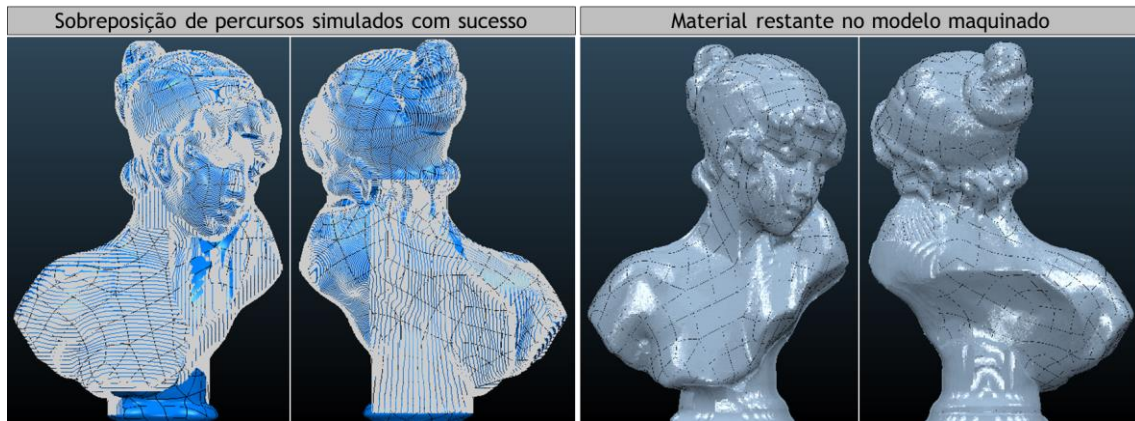


Figura 13-A - Imagens obtidas ao sobrepor os percursos com simulações aparentemente aceitáveis (à esquerda) e ao calcular todo o material que resta após a maquinagem dos mesmos, através de um modelo maquinado (à direita) [23].

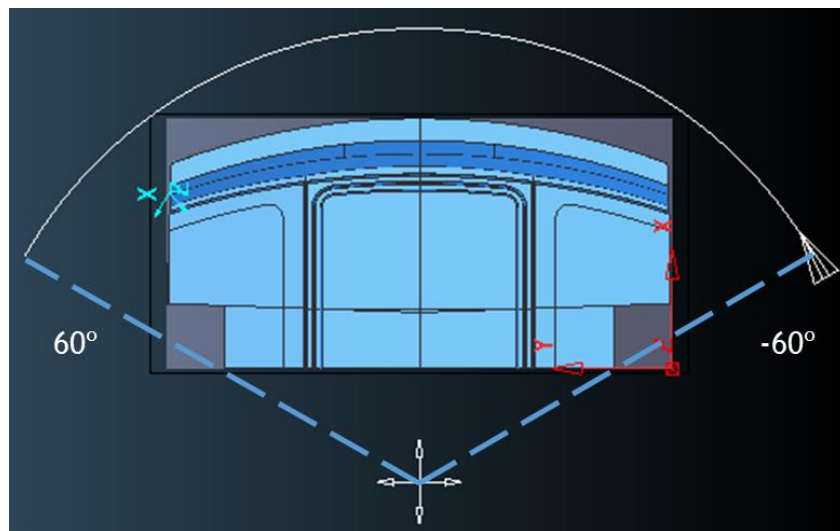


Figura 14-A - Vista de topo de um dos modelos, com a localização da linha escolhida e previsão do padrão dentro dos limites máximo e mínimo impostos ao ângulo azimutal [23].

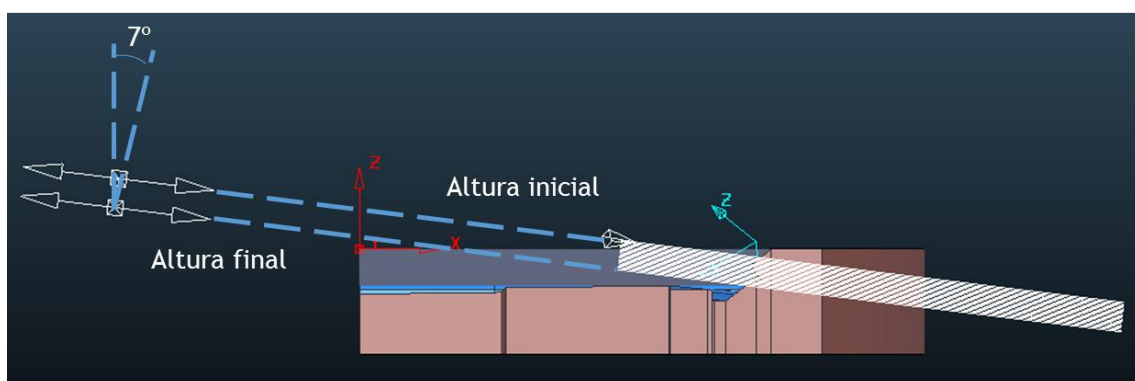


Figura 15-A - Vista lateral da previsão do padrão, estando já definidas a altura inicial e final da projeção e o ângulo de elevação da linha, para abranger a área a maquinar [23].

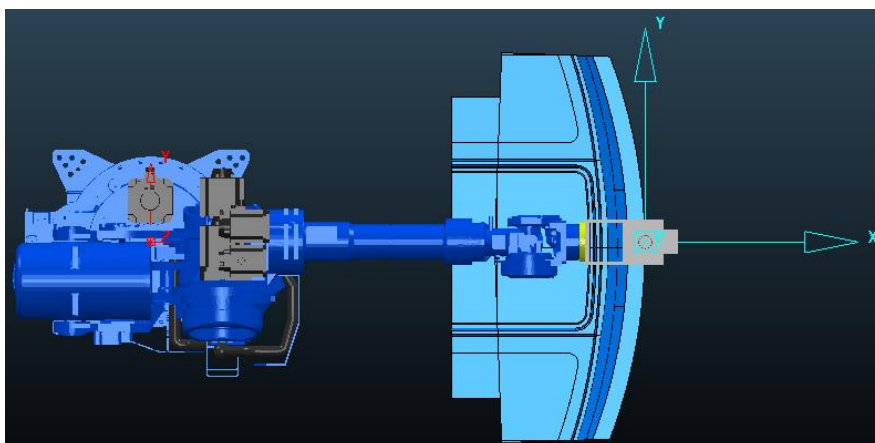


Figura 16-A - Vista de topo em que é possível ver a posição da célula robótica em relação ao modelo, quando o robô está na posição “home” [23].